

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DAİMİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN MODELLENMESİ  
ve MODERN DENETİM YÖNTEMLERİ ile HIZ ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Abdulahkim KARAKAYA**

**Anabilim Dalı: Elektrik Eğitimi**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ercüment KARAKAŞ**

**HAZİRAN 2005**

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAİMİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN MODELLENMESİ ve  
MODERN DENETİM YÖNTEMLERİ ile HIZ ANALİZİ

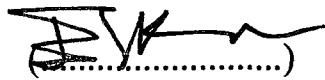
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Abdulkakim KARAKAYA

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Mayıs 2005

Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Haziran 2005

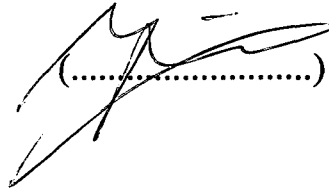
Tez Danışmanı

Yrd.Doç.Dr. Ercüment KARAKAŞ



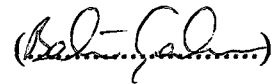
Üye

Yrd.Doç.Dr.Yaşar BİRBİR



Üye

Doç.Dr. Bekir ÇAKIR



HAZİRAN 2005

# DAİMİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN MODELLENMESİ ve MODERN DENETİM YÖNTEMLERİ ile HIZ ANALİZİ

**Abdulkakim KARAKAYA**

**Anahtar Kelimeler:** DMSM, PI, BM, BMPI, ÖABMPI ve DMSM parametreleri.

**Özet:** Daimi mıknatıslı senkron motorlar, karmaşık, doğrusal olmayan ve zamanla dinamikleri değişen bir karaktere sahiptirler. Bu yapılarına rağmen, endüstride hareket denetimi gibi yüksek moment gerektiren mühendislik problemlerine cevap vermektedir. Bu çalışmada, Daimi Mıknatıslı Senkron Motor (DMSM)'un doğrusal olmayan matematiksel modeli çıkarılarak, elde edilen modelin simülasyonu Matlab/Simulink paket programında gerçekleştirilmektedir. Motor parametreleri deneysel düzenek ile tespit edilmektedir ve bu parametreler motor modelinde kullanılmaktadır. Motor modelinin hız denetimi, Orantı-Integral (PI), Bulanık Mantık (BM), Bulanık Mantık PI (BMPI) ve Öz Ayarlı Bulanık Mantık PI (ÖABMPI) Denetleyicileri ile yapılmaktadır. Elde edilen hız grafiklerinden; yükselme zamanı, aşma miktarı ve kalıcı durum hatası analizi yapılmakta ve denetleyicilerin performansları karşılaştırılmaktadır.

# **MODELLING of PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR and SPEED ANALYSIS with MODERN CONTROL METHODS**

**Abdulahkim KARAKAYA**

**Keywords:** PMSM, PI, FL, FLPI, STFLPI and PMSM parameters.

**Abstract:** Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) have nonlinear characteristics whose dynamics change with time. In spite of this structure PMSM has answered engineering problems in industry such as motion control which needs high torque values. This paper obtains a nonlinear mathematical model of PMSM, and realizes simulation of obtained model in Matlab/Simulink program. Motor parameters are determined by an experimental set-up and they are used in motor model. Speed control of motor model is made with Proportional plus Integral (PI), Fuzzy Logic (FL), Fuzzy Logic PI (FLPI) and Self Tuning FLPI (STFLPI) controllers. Using the speed graphs obtained, rise time, overshoot, steady-state error and settling time are analyzed and controller performances are compared.

## ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Mevcut endüstri tesislerinde elektrik motorlarının kullanım alanları gittikçe büyümektedir. Mikroişlemcilerin gelişimi ile otomasyonda, karmaşık denetim tekniklerinin uygulanabilirliği artırılmıştır. Bu gelişme ışığında yeni elektrik motorlarına ihtiyaç duyulmuştur. Bunun sonucunda Daimi Mıknatıslı Senkron Motor üretilmiş ve denetimi için çeşitli yöntemler kullanılmıştır.

Daimi Mıknatıslı Senkron Motorun performansının ve güç yoğunluğunun yüksek olması gibi üstünlüklerinin olması bu motora olan ilgiyi artırmıştır. Bunun sonucunda motor hız denetimi için çeşitli yöntemler kullanılarak, denetim yönteminin performansına göre motor verimi daha da iyileştirileceği ve kullanımının artacağı açıktır.

Yapılan çalışma ile Daimi Mıknatıslı Senkron Motorun modellenmesi, parametrelerin belirlenmesi ve hız denetimi için kullanılan denetleyicilerin performans açısından hangisinin daha iyi olduğu konusunda katkı sağlaması hedeflenmiştir.

Tez süresince, çalışmalarımı yönlendiren ve destek sağlayan Yrd. Doç. Dr. Ercüment KARAKAŞ'a, çalışmalarına katkılarından dolayı TEF Elektrik Eğitimi Bölümü Arş. Görevlilerine ve beni yalnız bırakmadığından dolayı değerli eşime teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	iv
İÇİNDEKİLER .....	v
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
TABLolar DİZİNİ .....	xv
BÖLÜM 1. GİRİŞ .....	1
2.1. Tezin Amacı ve İzlenen Yöntem .....	2
BÖLÜM 2. DAİMİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN MODELLENMESİ ...	4
2.1. Daimi Miknatıslı Senkron Motorun Yapısı .....	7
2.2. Daimi Miknatıslı Senkron Motorun Matematiksel Modeli .....	7
2.1.1. Gerilim denklemleri .....	8
2.1.2. Moment denklemi .....	10
2.3. Daimi Miknatıslı Senkron Motorun Fazör Diyagramı .....	13
2.4. Dinamik Simülasyon .....	14
2.4.1. Referans gerilim bloğu .....	14
2.4.2. d-q gerilim bloğu .....	15
2.4.3. d-q akı ve akım bloğu .....	15
2.4.4. Elektromanyetik moment bloğu .....	16
2.4.5. Mekanik sistem bloğu .....	16
2.4.6. Üç faz $i_{abc}$ akım bloğu .....	17
2.4.7. Motorun toplam matematiksel modeli .....	18
BÖLÜM 3. MOTOR PARAMETRELERİNİN ÖLÇÜLMESİ.....	19
3.1. Kutup Sayısının Ölçülmesi (P) .....	20

3.2. Stator Faz Sargı Direncinin Ölçülmesi ( $r_s$ ).....	20
3.3. Senkron Endüktansların Ölçülmesi ( $L_d$ ve $L_q$ ) .....	21
3.4. Daimi Mıknatıs Akısının Ölçülmesi ( $\lambda_m$ ).....	22
<b>BÖLÜM 4. MODERN DENETİM YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>23</b>
4.1. PI Denetleyici .....	23
4.2. Bulanık Mantığın Tarihsel Gelişimi .....	24
4.3. Bulanık Mantık Denetleyici.....	25
4.3.1. Bulanıklaştırma (Fuzzification) .....	26
4.3.2. Durulaştırma (Defuzzification).....	26
4.3.3. Kural tabanı (Rule base) .....	27
4.3.4. Çıkarım (Inference).....	27
4.3.5. Bulanık mantık hız denetleyici bloğu .....	30
4.4. Bulanık Mantık PI Denetleyici .....	32
4.5. Öz Ayarlı Bulanık Mantık PI Denetleyici .....	33
4.5.1. Üyelik fonksiyonları .....	34
4.5.2. Ölçeklendirme faktörleri.....	35
4.5.3. Kural tabanları .....	35
4.5.4. Öz ayar mekanizması.....	36
<b>BÖLÜM 5. DENETİM YÖNTEMLERİNİN PERFORMANS ANALİZİ .....</b>	<b>38</b>
5.1. Yüksüz Durumda .....	38
5.2. Yüklü Durumda .....	47
5.3. Ani Yüklü Durumda .....	56
5.4. Referans Hız Takibi.....	68
<b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>78</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>80</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>83</b>

## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

$B$	: Sönüm katsayısı
$ce$	: Hata değişimi
$e$	: Hata
$e_{ss}$	: Yüksüz durumda kalıcı durum hatası
$e_{ssi}$	: Ani yüklü durumda kalıcı durum hatası
$G_e$	: Hata giriş değişkeni için ölçeklendirme faktörü
$G_{ce}$	: Hata değişimi giriş değişkeni için ölçeklendirme faktörü
$G_{\Delta i_q}$	: Çıkış ölçeklendirme faktörü
$K_i$	: İntegral etki kazancı
$K_p$	: Orantı kazancı
$L_d, L_q$	: Rotor d ve q eksenli endüktansları
$i_a, i_b, i_c$	: Stator faz akımları
$i_a^*, i_b^*, i_c^*$	: Referans stator faz akımları
$i_q^*$	: q eksenli referans akım değeri
$\Delta i_q^*$	: q eksenli referans akım değişimi
$i_d, i_q$	: Rotor referans d, q eksenli stator akımları
$f_r = f$	: Elektriksel frekans
$f_{ref}$	: Referans frekans
$J$	: Eylemsizlik momenti
$n$	: Devir sayısı
$O_s$	: Yüksüz durumda aşma miktarı
$O_{si}$	: Ani yüklü durumda aşma miktarı
$P$	: Çift kutup sayısı
$P_e$	: Toplam giriş gücü
$P_{em}$	: Elektromekanik güç
$r_a = r_b = r_c = r_s$	: Faz başına stator sargı dirençleri

$T_e$	: Elektromanyetik moment
$T_i$	: İntegral etki zamanı
$T_L$	: Yük momenti
$t_{rL}$	: Yüklü durumda açısal hızın yükselme zamanı
$t_{ro}$	: Yüksüz durumda açısal hızın yükselme zamanı
$t_{sL}$	: Yüklü durumda açısal hızın nominal değere ulaşma zamanı
$t_{so}$	: Yüksüz durumda açısal hızın nominal değere ulaşma zamanı
$\Delta t_i$	: Ani yüklü durumda hızın referans değerine ulaşma zamanı
$U_p$	: Kutup tekerleği gerilimi
$v_a, v_b, v_c$	: Stator faz gerilimleri
$v_d, v_q$	: Rotor referans d,q eksenli stator gerilimleri
$v_m$	: Gerilimin tepe değeri
$V_{rms}$	: Faz-faz gerilim etkin değeri
$\omega_r$	: Elektriksel rotor hızı
$\omega_{m}$	: Mekaniksel rotor hızı
$\omega^*$	: Referans hız
$\Delta\omega_i$	: Ani yüklü durumda açısal hız değişimi
$x_d, x_q$	: d-q eksenli reaktansları
$\lambda_d, \lambda_q$	: Rotor referans d,q eksenli stator akıları
$\lambda_m$	: Mıknatıs malzemenin stator sargılarında oluşturduğu uyarma akısı
$\delta$	: Yük açısı
$\delta_1$	: Moment açısı
$\varphi$	: Güç faktörü açısı
$\theta_r$	: q ekseninin stator faz sargısı ile yapmış olduğu açı
$\alpha$	: Kazanç yenileme faktörü
$\mu$	: Üyelik derecesi
$\mu(ce)$	: ce girişinin üyelik derecesi
$\mu(e)$	: e girişinin üyelik derecesi
$\mu(\Delta i_q^*)$	: $\Delta i_q^*$ çıkışının üyelik derecesi
AA	: Alternatif akım

B	: Büyük
BB	: Biraz büyük
BM	: Bulanık mantık
BMPI	: Bulanık mantık PI
ÇB	: Çok büyük
ÇK	: Çok küçük
DA	: Doğru akım
DMAAM	: Daimi mıknatıslı alternatif akım motoru
DMDAM	: Daimi mıknatıslı doğru akım motoru
DMSM	: Daimi mıknatıslı senkron motor
FDAM	: Fırçasız doğru akım motoru
K	: Küçük
NB	: Negatif büyük
NK	: Negatif küçük
NO	: Negatif orta
OB	: Orta büyük
ÖABMPI	: Öz ayarlı bulanık mantık PI
PI	: Proportional integral $\equiv$ Orantı integral
PID	: Proportional integral derivative $\equiv$ Orantı integral türev
PB	: Pozitif büyük
PK	: Pozitif küçük
PO	: Pozitif orta
PWM	: Pulse Width Modulation $\equiv$ Darbe genişlik modülasyonu
S	: Sıfır

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Daimi mıknatıslı elektrik motorlarının alt grupları.....	4
Şekil 2.2. Bir DMSM rotorunun farklı taslak görünüşleri (a) İçte gömülü (b) Yüzeyle monteli .....	6
Şekil 2.3. Aralarında 90° elektriksel açı bulunan d-q eksenleri.....	8
Şekil 2.4. DMSM'nin d-q eşdeğer devresi.....	9
Şekil 2.5. DMSM'nin fazör diyagramı .....	13
Şekil 2.6. DMSM'nin blok diyagramı.....	14
Şekil 2.7. Üç faz gerilimin oluşturulması.....	15
Şekil 2.8. d-q gerilim bloğu .....	15
Şekil 2.9. $i_d$ ve $i_q$ akımları bloğu .....	16
Şekil 2.10. Elektromanyetik moment bloğu.....	16
Şekil 2.11. Mekanik sistem bloğu.....	17
Şekil 2.12. $i_{abc}$ akım bloğu .....	17
Şekil 2.13. DMSM'nin toplam matematiksel modeli .....	18
Şekil 3.1. DMSM parametrelerinin ölçülmesi için kurulan deney düzeneği blok diyagramı .....	19
Şekil 3.2. $L_d$ ve $L_q$ endüktans değerlerinin ölçülmesi için bağlantı şeması .....	21
Şekil 4.1. DMSM hız denetimi blok diyagramı .....	23
Şekil 4.2. PI denetleyici blok şeması .....	24
Şekil 4.3. BM denetleyici içyapısı .....	26
Şekil 4.4. VE tipi bulanık çıkarım.....	28
Şekil 4.5. Ağırlık merkezi metodu .....	29
Şekil 4.6. VEYA tipi bulanık çıkarım.....	29
Şekil 4.7. BM denetleyici yapısı .....	30
Şekil 4.8. $e$ , $c_e$ ve $\Delta i_q^*$ bulanık değişkenlerinin üyelik fonksiyonları .....	31
Şekil 4.9. BMPI denetleyici yapısı.....	32
Şekil 4.10. $E$ , $CE$ ve $\Delta I_q$ için üyelik fonksiyonları.....	33
Şekil 4.11. ÖABMPI denetleyici blok diyagramı .....	33

Şekil 4.12. E, CE ve $\alpha$ için üyelik fonksiyonları.....	34
Şekil 5.1. DMSM'nin PI ve BM denetleyiciler ile yüksüz durumda hız cevapları ...	40
Şekil 5.2. DMSM'nin BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyiciler ile yüksüz durumda hız cevapları .....	40
Şekil 5.3. DMSM'nin PI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen $i_{abc}$ faz akım değerlerinin zamana göre değişimi .....	41
Şekil 5.4. DMSM'nin BM denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen $i_{abc}$ akım değerlerinin zamana göre değişimleri .....	41
Şekil 5.5. DMSM'nin BMPI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen $i_{abc}$ akım değerlerinin zamana göre değişimleri .....	42
Şekil 5.6. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen $i_{abc}$ akım değerlerinin zamana göre değişimleri .....	42
Şekil 5.7. DMSM'nin PI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.....	43
Şekil 5.8. DMSM'nin BM denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.....	43
Şekil 5.9. DMSM'nin BMPI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.....	44
Şekil 5.10. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.....	44
Şekil 5.11. DMSM'nin PI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen $i_q$ akımının zamana göre değişimi.....	45
Şekil 5.12. DMSM'nin BM denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen $i_q$ akımının zamana göre değişimi.....	45
Şekil 5.13. DMSM'nin BMPI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen $i_q$ akımının zamana göre değişimi.....	46
Şekil 5.14. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen $i_q$ akımının zamana göre değişimi .....	46
Şekil 5.15. DMSM'nin PI ve BM denetleyiciler ile yüklü durumda hız cevapları....	49
Şekil 5.16. DMSM'nin BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyiciler ile yüklü durumda hız cevapları .....	49
Şekil 5.17. DMSM'nin PI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen $i_{abc}$ akım değerlerinin zamana göre değişimleri .....	50

Şekil 5.18. DMSM'nin BM denetleyici ile yüklü durumda elde edilen $i_{abc}$ akım değerlerinin zamana göre değişimleri .....	50
Şekil 5.19. DMSM'nin BMPI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen $i_{abc}$ akım değerlerinin zamana göre değişimleri .....	51
Şekil 5.20. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen $i_{abc}$ akım değerlerinin zamana göre değişimleri .....	51
Şekil 5.21. DMSM'nin PI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.....	52
Şekil 5.22. DMSM'nin BM denetleyici ile yüklü durumda elde edilen $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.....	52
Şekil 5.23. DMSM'nin BMPI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.....	53
Şekil 5.24. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.....	53
Şekil 5.25. DMSM'nin PI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen $i_q$ akımının zamana göre değişimi.....	54
Şekil 5.26. DMSM'nin BM denetleyici ile yüklü durumda elde edilen $i_q$ akımının zamana göre değişimi.....	54
Şekil 5.27. DMSM'nin BMPI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen $i_q$ akımının zamana göre değişimi.....	55
Şekil 5.28. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen $i_q$ akımının zamana göre değişimi .....	55
Şekil 5.29. DMSM'nin, $T_L=0.63$ Nm ile ani yüklenmesi sonucu PI ve BM denetleyicilerin hız cevapları .....	59
Şekil 5.30. DMSM'nin, $T_L=0.63$ Nm ile ani yüklenmesi sonucu BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyicilerin hız cevapları.....	59
Şekil 5.31. DMSM'nin, $T_L=0.83$ Nm ile ani yüklenmesi sonucu PI ve BM denetleyicilerin hız cevapları .....	60
Şekil 5.32. DMSM'nin, $T_L=0.83$ Nm ile ani yüklenmesi sonucu BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyicilerin hız cevapları.....	60
Şekil 5.33. DMSM'nin, $T_L=1.03$ Nm ile ani yüklenmesi sonucu PI ve BM denetleyicilerin hız cevapları .....	61

Şekil 5.34. DMSM'nin, $T_L=1.03$ Nm ile ani yüklenmesi sonucu BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyicilerin hız cevapları.....	61
Şekil 5.35. DMSM'nin PI denetleyici kullanılarak, $T_L=0.83$ Nm ile ani yüklü durumda elde edilen $i_{abc}$ akım değerlerinin zamana göre değişimleri.....	62
Şekil 5.36. DMSM'nin BM denetleyici kullanılarak, $T_L=0.83$ Nm ile ani yüklü durumda elde edilen $i_{abc}$ akım değerlerinin zamana göre değişimleri.....	62
Şekil 5.37. DMSM'nin BMPI denetleyici kullanılarak, $T_L=0.83$ Nm ile ani yüklü durumda elde edilen $i_{abc}$ akım değerlerinin zamana göre değişimleri.....	63
Şekil 5.38. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici kullanılarak, $T_L=0.83$ Nm ile ani yüklü durumda elde edilen $i_{abc}$ akım değerlerinin zamana göre değişimleri.....	63
Şekil 5.39. DMSM'nin PI denetleyici kullanılarak, $T_L=0.83$ Nm ile ani yüklü durumda elde edilen $T_e$ 'nin zamana göre değişimi .....	64
Şekil 5.40. DMSM'nin BM denetleyici kullanılarak, $T_L=0.83$ Nm ile ani yüklü durumda elde edilen $T_e$ 'nin zamana göre değişimi .....	64
Şekil 5.41. DMSM'nin BMPI denetleyici kullanılarak, $T_L=0.83$ Nm ile ani yüklü durumda elde edilen $T_e$ 'nin zamana göre değişimi .....	65
Şekil 5.42. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici kullanılarak, $T_L=0.83$ Nm ile ani yüklü durumda elde edilen $T_e$ 'nin zamana göre değişimi .....	65
Şekil 5.43. DMSM'nin PI denetleyici kullanılarak, $T_L=0.83$ Nm ile ani yüklü durumda elde edilen $i_q$ akımının zamana göre değişimi .....	66
Şekil 5.44. DMSM'nin BM denetleyici kullanılarak, $T_L=0.83$ Nm ile ani yüklü durumda elde edilen $i_q$ akımının zamana göre değişimi .....	66
Şekil 5.45. DMSM'nin BMPI denetleyici kullanılarak, $T_L=0.83$ Nm ile ani yüklü durumda elde edilen $i_q$ akımının zamana göre değişimi .....	67
Şekil 5.46. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici kullanılarak, $T_L=0.83$ Nm ile ani yüklü durumda elde edilen $i_q$ akımının zamana göre değişimi .....	67
Şekil 5.47. DMSM'nin $T_L=0$ ve $0.63$ Nm ile yüklü durumda, PI denetleyici kullanılarak, referans hız değişiminde elde edilen grafikler .....	71
Şekil 5.48. DMSM'nin $T_L=0.83$ ve $1.03$ Nm ile yüklü durumda, PI denetleyici kullanılarak, referans hız değişiminde elde edilen grafikler .....	71
Şekil 5.49. DMSM'nin $T_L=0$ Nm ile yüklü durumda, BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyici kullanılarak, referans hız değişiminde elde edilen grafikler..	72

- Şekil 5.50. DMSM'nin  $T_L=0.63$  Nm ile yüklü durumda, BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyici kullanılarak, referans hız değişiminde elde edilen grafikler.. 72
- Şekil 5.51. DMSM'nin  $T_L=0.83$  Nm ile yüklü durumda, BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyici kullanılarak, referans hız değişiminde elde edilen grafikler.. 73
- Şekil 5.52. DMSM'nin  $T_L=1.03$  Nm ile yüklü durumda, BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyici kullanılarak, referans hız değişiminde elde edilen grafikler.. 73
- Şekil 5.53. DMSM'nin PI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0$  Nm ile referans hız takibi durumunda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi ..... 74
- Şekil 5.54. DMSM'nin BM denetleyici kullanılarak,  $T_L=0$  Nm ile referans hız takibi durumunda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi ..... 74
- Şekil 5.55. DMSM'nin BMPI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0$  Nm ile referans hız takibi durumunda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi ..... 75
- Şekil 5.56. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0$  Nm ile referans hız takibi durumunda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi ..... 75
- Şekil 5.57. DMSM'nin PI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile referans hız takibi durumunda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi ..... 76
- Şekil 5.58. DMSM'nin BM denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile referans hız takibi durumunda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi ..... 76
- Şekil 5.59. DMSM'nin BMPI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile referans hız takibi durumunda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi ..... 77
- Şekil 5.60. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile referans hız takibi durumunda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi ..... 77

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. DMSM parametreleri.....	22
Tablo 4.1. Hız denetimi için bulanık denetim kuralları .....	31
Tablo 4.2. $\alpha$ 'nın hesaplanması için bulanık kurallar .....	34
Tablo 5.1. DMSM yüksüz durumda denetleyicilerin hız performans analizi .....	39
Tablo 5.2. DMSM yüksüz durumda denetleyici performanslarının karşılaştırılması..	39
Tablo 5.3. DMSM yüklü durumda denetleyicilerin hız performans analizi .....	48
Tablo 5.4. DMSM yüklü durumda denetleyici performanslarının karşılaştırılması ..	48
Tablo 5.5. DMSM'nin, TL=0.63 Nm ile ani yüklü durumda denetleyicilerin hız performans analizi.....	57
Tablo 5.6. DMSM'nin, TL=0.83 Nm ile ani yüklü durumda denetleyicilerin hız performans analizi.....	57
Tablo 5.7. DMSM'nin TL=1.03 Nm ile ani yüklenmesi durumda denetleyicilerin hız performans analizi.....	57
Tablo 5.8. DMSM'nin, TL=0.83 Nm ile ani yüklü durumda denetleyicilerin performanslarının karşılaştırılması.....	58
Tablo 5.9. DMSM'nin TL=0 Nm ile yüklü durumda, denetleyicilerin referans hız takibi performans analizi.....	69
Tablo 5.10. DMSM'nin TL=0.63 Nm ile yüklü durumda, denetleyicilerin referans hız takibi performans analizi .....	69
Tablo 5.11. DMSM'nin TL=0.83 Nm ile yüklü durumda, denetleyicilerin referans hız takibi performans analizi .....	70
Tablo 5.12. DMSM'nin TL=1.03 Nm ile yüklü durumda, denetleyicilerin referans hız takibi performans analizi .....	70

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Üstün performans istenen uygulamalarda, DMSM'nin; yüksek moment, yüksek güç, düşük sesle ve verimli çalışması gibi üstünlüklerinin bulunması diğer alternatif akım motorlarından daha popüler olmasını sağlamaktadır. Endüstride robotlar, hadde fabrikaları, motor araçları gibi alanlarda DMSM'leri sürmek için kullanılan yüksek performanslı sürücü sistemlerinde, parametre değişimlerine duyarsızlık ve herhangi bir hız değişimi sonucunda hızın referans değere en kısa zamanda ulaşması gibi koşullar, istenen temel kriterlerden biridir. Geleneksel "PI" ve "PID" denetleyiciler, DMSM sürücülerinde hız denetleyici olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bununla birlikte, denetimlerden en iyi sonucun alınabilmesi için, DMSM'nin d-q eksenli reaktans parametrelerinin tam olarak elde edilmesi gerekmektedir. Bu oldukça zordur ve sabit kazançlı PI ve PID denetleyiciler; yük değişimi, parametre değişimi ve referans hız değişimlerine karşı oldukça duyarlıdır [21]. Bu nedenle, yüksek performanslı sürücü sistemlerinde DMSM'nin özel bir denetleyici ile hız denetimi yapılması gerekmektedir [26].

Son yıllarda, sistem modellemesi ve denetim uygulamaları için bulanık algoritma geliştirme çalışmaları yapılmaktadır [7, 28]. Bulanık Mantık Denetimde, sistemin değişen parametrelerine göre denetim kural kümelerinin yeniden düzenlenmesi oldukça zordur ve bu olumsuz durumu ortadan kaldırmak için yapay zeka temelli, PI ile BM'nin birleşimi olan hız denetleyicilerinin tasarlandığı görülmektedir [2]. Benzer şekilde BM denetleyici de, ÖABMPI denetleyici gibi farklı yapılarda modellenebilmektedir [11, 14, 20, 23]. Sistem çıkışlarının denetiminde ÖABMPI denetleyicinin kullanılması performans açısından daha iyi sonuçlar verebilmektedir [5, 15, 16].

DMSM ile yapılan çalışmalara bakıldığında; Mudi and Pal tarafından ÖABMPI denetleyicinin yapısı anlatılarak, ikinci dereceden transfer fonksiyonlarına uygulanan birim basamak fonksiyonun cevabı incelenmekte ve BMPI ile karşılaştırılmaktadır

[15]. Patel and Mohan tarafından BMPI denetleyici yapısının analizi yapılmaktadır [19]. Güney et al, DMSM'nin stator faz akımı, akı ve moment denetimi için BM denetleyici ve PWM (darbe genişlik modülasyonu) kullanarak, DMSM'nin dinamik davranışını incelemişlerdir [9]. Ohm et al, DMSM'nin matematiksel modelini oluşturarak parametrelerini deney yolu ile elde etmişlerdir [17]. Singh et al, DMSM sürücüsünün bulanık mantık denetleyici ile performans analizini gerçekleştirerek, akım, gerilim, hız ve moment değişim grafiklerini incelemişlerdir [24]. Uddin and Rahman, içe gömülü DMSM'nin bulanık mantık temelli hız denetimini yaparak deneylerden elde edilen sonuçla simülasyon sonuçlarını karşılaştırmışlardır [26]. Senjyu et al, yüksek hızlı DMSM'ler için gerçek parametrelerin ölçümü üzerine çalışarak, ölçülen değerlerle hesaplanan değerler arasında karşılaştırma yapmışlardır [22].

Bu çalışmada ise, DMSM'nin matematiksel modeli çıkarılmakta ve elde edilen modelin simülasyonu Matlab/Simulink paket programında gerçekleştirilmektedir. Simülasyonda kullanılan parametreler, 260.75 W gücündeki DMSM'den ölçülen gerçek değerler olup, bu parametrelerle elde edilen motor hızı grafiklerinden; yükselme zamanı, aşma miktarı ve kalıcı durum hatası analizi yapılmaktadır.

## **1.2. Tezin Amacı ve İzlenen Yöntem**

DMSM'nin bilinen geleneksel motorlara nazaran üstünlüklerinin olmasına karşılık denetiminin zor olması, araştırmacıları bu motorun denetiminin en iyi performansla sağlanabilmesi için çeşitli denetim yöntemleri kullanmaya sevk etmiştir. Bu tezin amacı; DMSM'nin matematiksel modelini ve parametre ölçümlerini yaparak, hız denetimi için kullanılan PI, BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyicilerden hangisinin performans açısından daha üstün olduğunu tespit etmektir.

Hazırlanan tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; yapılan çalışmanın içeriğine ve amacına değinilmiştir. İkinci bölümde; DMSM'nin matematiksel modeli Matlab/Simulink paket programında oluşturulmaktadır. Üçüncü bölümde; motor parametrelerinin ölçümü için yapılan deney düzeneği ve ölçüm sonuçları yer almaktadır. Dördüncü bölümde; kullanılan modern denetim yöntemleri

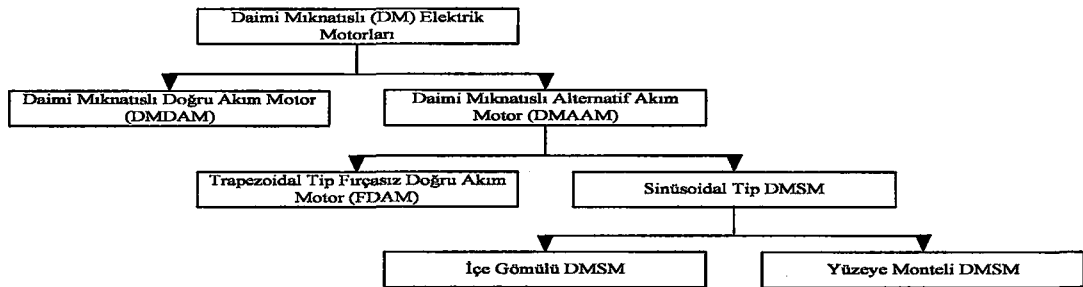
hakkında bilgi verilmektedir. Beşinci bölümde; denetim yöntemlerinin performans analizi ve simülasyon sonuçları yer almaktadır.



## BÖLÜM 2. DAİMİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN MODELLENMESİ

DMSM'ler, endüstride robotlar, hadde fabrikaları, motor araçları gibi alanlarda gün geçtikçe daha çok tercih edilmektedir. Böyle olmasının başlıca nedenleri, güç yoğunluğunun fazla olması, yüksek moment elde edilebilmesi ve asenkron motorlara göre daha verimli olmasıdır. Geleneksel senkron motorlar ile karşılaştırıldığında DMSM'nin rotorunda sargılar yerine mıknatıslar yerleştirilmektedir. DMSM'nin rotorundaki mıknatıslar, senkron motorun rotoruna yerleştirilen sargıların oluşturduğu elektrik alanına eş değerde manyetik alan oluşturmaktadır. Rotorun sargılı olması, bazı olumsuzlukları ortaya çıkarmaktadır. Geleneksel senkron motorda manyetik alan oluşumu için fırçalar, bilezikler ve rotora yerleştirilen sargıların bulunması, DMSM'ye göre hacim ve kütlesini artıran faktörlerdir. Aynı zamanda DMSM'nin rotorunda akım olmaması nedeniyle bakır kayıpları yoktur. Bu kıstaslara göre DMSM'nin kullanıcıya getirileri, daha yüksek verimli ve daha az hacimli aynı elektriksel güçte motor olarak kullanılabilmesidir. Diğer taraftan, DMSM'de daimi mıknatıslar sabit akı üretirler ve bu, rotor akımı değişen geleneksel senkron motor kadar kolay kontrol edilemeyebilir. Kontrol problemlerine rağmen, verim, güç yoğunluğu ve yüksek moment gibi üstünlüklerinin olması DMSM'nin tercih edilmesini sağlamaktadır [22].

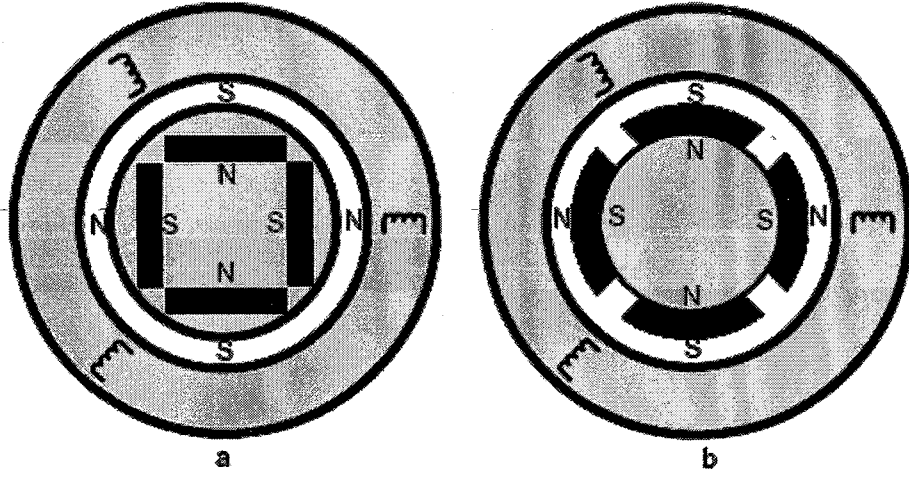
DMSM'ler birkaç gruptan oluşabilir. Bunlar Şekil 2.1'de görüldüğü gibi gruplandırılabilir [4]:



Şekil 2.1. Daimi mıknatıslı elektrik motorlarının alt grupları.

Motorlar, alternatif akım (AA) ve doğru akım (DA) olmak üzere besleme biçimlerine göre sınıflandırılabilir. Daimi mıknatıslı motorun yapısı geleneksel DA motor yapısına benzemektedir. DA motoru ile DMSM'nin farkları, DMSM'nin rotorunda elektrik sargıları yerine daimi mıknatıslar kullanılır ve DA motorlarında fırçalar ile kollektörler bulunmaktadır.

DMAAM'de mıknatıslar rotora yerleştirilir. Bu motorlarda kollektör ve fırçalar olmadığı için bunlara bağlı olarak oluşan problemler de söz konusu değildir. DMAAM'lerin trapezoidal ve sinüsoidal tip olmak üzere alt grupları bulunmaktadır. Trapezoidal tip DMAAM, fırçasız doğru akım motoru (FDAM) olarak da isimlendirilmektedir. Sinüsoidal DMAAM ise geleneksel senkron motora benzediği için DMSM olarak isimlendirilmektedir. Bu iki motor arasındaki fark besleme geriliminin FDAM'lerde trapezoidal, DMSM'lerde ise sinüsoidal olmasıdır. Aynı zamanda akım değişimleri FDAM'lerde trapezoidal, DMSM'lerde ise sinüsoidaldir. Denetim işlevinin basitliği nedeni ile ilk olarak fırçasız motorlar üretilmiştir. Fakat moment değişiminin dalgacıklı olması nedeni ile yüksek performanslı hareket denetim uygulamalarında kullanılması uygun görülmemektedir [4]. Daha sonra, AA motorlarının vektör denetim prensibi ile yüksek performansı elde edilebildiğinden dolayı sinüsoidal motor geliştirildi. DMSM, sinüsoidal motorlara nazaran birçok üstünlüğünün olması, son yıllarda popülerliğinin artmasını sağlamaktadır. DMSM'ler mıknatısların rotor içerisine çeşitli şekillerde yerleştirildiği içe gömülü tip ve mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirildiği yüzeye monteli tip olmak üzere iki şekilde imal edilebilirler. Bu iki tip motorun rotor şekilleri Şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2.2. Bir DMSM rotorunun farklı taslak görünüşleri (a) İçe gömülü (b) Yüzeye monteli.

DMSM'nin avantajlarının olmasına rağmen dezavantajları da vardır. Bu avantaj ve dezavantajları sıralayacak olursak;

DMSM'nin avantajları:

- DMSM'nin rotorunda fırçalar, bilezikler ve kollektörler bulunmamaktadır.
- Rotorunda sargı yerine mıknatısların bulunması verimini artırmaktadır. Rotorda daimi mıknatıs bulunduğundan dolayı uyarma akısına gerek yoktur. Bu nedenle uyarma kayıpları söz konusu değildir.
- Rotorda sargılar bulunmadığı için DMSM'nin soğutması daha kolay sağlanabilmektedir.
- Aynı güçteki diğer motorlara göre hacim ve ağırlığı daha azdır.

DMSM'nin dezavantajları:

- Stator alanı ile senkronizasyon sağlanabilmesi için, rotor pozisyonu bilinmesi gerekiyor. Rotor pozisyonu sensörlerle belirlenebilir, fakat bu karmaşıklık ve maliyeti artırdığı, aynı zamanda güvenilirliği azalttığı için istenmez.
- Daimi mıknatıs ve stator alanı arasında senkronizasyon sağlayabilmek için akım veya gerilim girişleri bir denetleyici tarafından kontrol edilmelidir.

- Generatör çalışma durumunda, gerilim ayarı, uyarma akımı olmadığından dolayı yapılamaz.

### **2.1. Daimi Mıknatıslı Senkron Motorun Yapısı**

Senkron motorların ayırıcı özelliklerinden bir tanesi, bağlandığı güç kaynağının frekansı ve ihtiva ettiği kutup sayısı ile belirlenen bir hızla, kaymasız olarak çalışmasıdır. Bu tip motorların alternatif akımla enerjilenen stator bobinlerinde bir döner manyetik alan meydana gelir. Mil üzerine yerleştirilen bilezikler üzerinden rotora doğru gerilim uygulanarak bağımsız ikinci bir alan oluşturulur. Rotor, statorla aynı sayıda bobine sahiptir. Normal çalışma hızında bu kutuplar (kuzey ve güney) birbirleriyle manyetik olarak kilitlenir ve böylece rotor hızı, statorun döner manyetik alanının hızı ile aynı olur. Diğer bir ifadeyle rotor, senkron hızla döner. Endüksiyon motorlarınsının aksine senkron motorlara bağlanan yükteki değişimler, hızda bir değişikliğe neden olmaz [8].

Senkron motorlar uyarma şekillerine göre farklı tipleri bulunmaktadır. Bunlar, doğru akım uyarma sargıları, daimi mıknatıslar ile olabildiği gibi relüktans tipinde de olabilmektedir. Daimi mıknatıslar kullanılarak yapılan yeni tip motorlar, kullanılan malzeme ve denetim yöntemlerinin geliştirilmesi ile daha popüler hale gelmektedir. Uyarma akımından dolayı meydana gelen kayıplar, doğru akım uyarma sargıları yerine daimi mıknatıslar kullanılarak azaltılmaktadır. DMSM'nin statoru, senkron motorun statoru ile aynıdır. DMSM'nin rotoruna sargı yerine değişik tasarım tiplerine göre daimi mıknatıs malzemeler kullanılmaktadır. Rotora yerleştirilen mıknatıslar, tasarım özelliklerine göre yüzeye monte edilebildiği gibi rotorun içine farklı yapılarda yerleştirilebilmektedir.

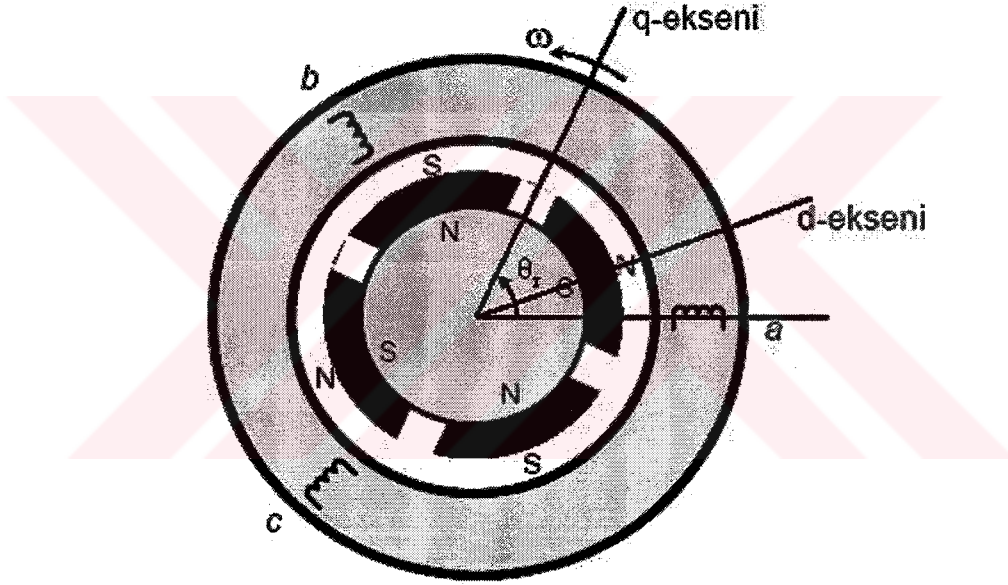
### **2.2. Daimi Mıknatıslı Senkron Motorun Matematiksel Modeli**

DMSM'nin simülasyonu ve hız denetimi için bir model oluşturulmaktadır. DMSM'nin, d-q eksen sistemine göre modelinin oluşumunda rotor referans teorisi kullanılarak motorun dinamik modeli oluşturulmaktadır. Simülasyon için aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmaktadır.

- Hava aralığı manyetik akısı ve stator sargıları sinüsoidal olarak dağılmaktadır.
- Eddy akımlarından dolayı oluşan çekirdek kayıpları ve histeresiz kayıpları ihmal edilmektedir.
- Rotorda kafes bulunmamaktadır.
- Motor simetrik olduğu kabul edildiğinden fazlar dengeli olarak dağılmaktadır.
- Malzemede manyetik doymanın etkisi ihmal edilmektedir.

### 2.2.1. Gerilim denklemleri

Şekil 2.3'de aralarında  $90^\circ$  elektriksel açı bulunan d-q eksenleri ve Şekil 2.4'de DMSM'nin d-q sistemindeki eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 2.3. Aralarında  $90^\circ$  elektriksel açı bulunan d-q eksenleri.

$v_{a,b,c}$  gerilim değişkenleri  $v_{d,q,0}$  eksen takımına dönüştürülmekte olup, dönüştürme matrisi denklem (2.1)'de görülmektedir;

$$\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

denklem (2.1)'de,  $\theta_r$ ; q ekseninin stator faz sargısı ile yapmış olduğu açığı ifade etmektedir. Stator sargıları için "d-q" gerilim eşitlikleri, denklem (2.2) ve (2.3)'de görülmektedir:

$$v_q = r_s \cdot i_q + \frac{d(\lambda_q)}{dt} + \omega_r \cdot \lambda_d \quad (2.2)$$

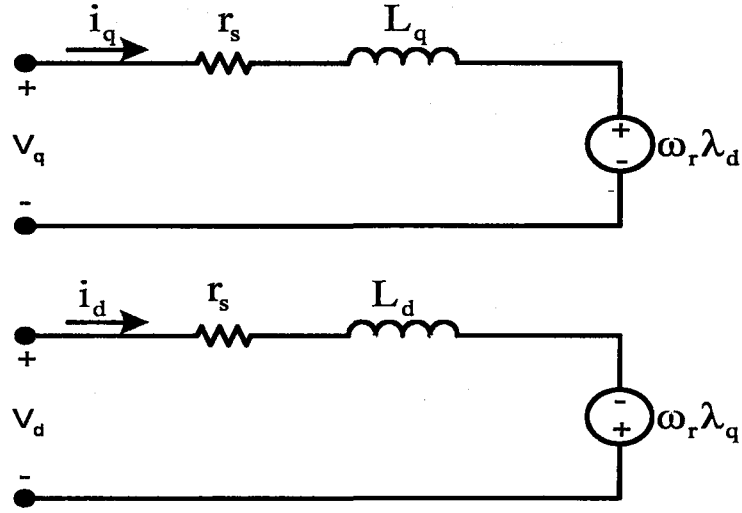
$$v_d = r_s \cdot i_d + \frac{d(\lambda_d)}{dt} - \omega_r \cdot \lambda_q \quad (2.3)$$

Denklem (2.2) ve (2.3)'de,  $\lambda_d$  ve  $\lambda_q$ :

$$\lambda_d = L_d \cdot i_d + \lambda_m \quad (2.4)$$

$$\lambda_q = L_q \cdot i_q \quad (2.5)$$

olarak alınmaktadır. Burada,  $v_d$  ve  $v_q$ ; d-q eksen stator gerilimlerini,  $i_d$  ve  $i_q$ ; d-q eksen stator akımlarını temsil etmektedir.  $L_d$  ve  $L_q$ ; d-q eksen endüktanslarını,  $r_s$ ; faz başına stator direnci,  $\omega_r$ ; elektriksel rotor hızı (senkron hızı) göstermektedir.  $\lambda_m$ ; mıknatıs malzemenin stator sargılarında oluşturduğu uyarma akısını ifade etmektedir.



Şekil 2.4. DMSM'nin d-q eşdeğer devresi.

### 2.2.2. Moment denklemi

Üç fazlı senkron motorun, d-q değişkenlerine göre toplam giriş gücü ifadesi denklem (2.6)'da görülmektedir;

$$P_e = \frac{3}{2} (v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q) \quad (2.6)$$

denklem (2.2) ve (2.3) deki  $v_d$  ve  $v_q$  eşitlikleri, (2.6) denkleminde yerine konulursa (2.7) numaralı denklem elde edilir;

$$P_e = \frac{3}{2} (r_s \cdot i_d^2 + r_s \cdot i_q^2) + \frac{3}{2} \frac{d(i_d \cdot \lambda_d + i_q \cdot \lambda_q)}{dt} + \frac{3}{2} \omega_r \cdot (i_q \cdot \lambda_d - i_d \cdot \lambda_q) \quad (2.7)$$

denklem (2.7)'deki ilk terim iletkenlerdeki güç kayıplarını, ikinci terim manyetik alanda depolanan enerjinin zamana göre değişimini ve üçüncü terim ise elektrik enerjisinden elde edilen mekanik enerjiyi ifade etmektedir. Güç denkleminin üçüncü teriminden yararlanarak moment ifadesi denklem (2.8)'deki gibi yazılabilir;

$$P_{em} = \omega_m \cdot T_e = \frac{3}{2} \omega_r (\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d) \quad (2.8)$$

burada,  $P_{em}$ ; elektromekanik gücü ve  $T_e$ ; motorun ürettiği momenti ifade etmektedir.

$\omega_r$  ve  $\omega_m$  arasındaki bağıntı ise;

$$\omega_r = \frac{P}{2} \cdot \omega_m \quad (2.9)$$

olmaktadır.  $\omega_m$ ; rotorun mekaniksel hızı ve  $P$ ; çift kutup sayısıdır. d-q değişkenlerine göre senkron motor için elektromanyetik moment  $T_e$  denklem (2.10)'da verilmektedir:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d) \quad (2.10)$$

ile ifade edilmektedir. Denklem (2.4) ve (2.5) kullanılarak, denklem (2.10) yeniden düzenlenecek olursa, elektriksel büyüklükler ile tanımlanan denklem (2.11) elde edilir:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_m \cdot i_q + (L_d - L_q) i_d \cdot i_q] \quad (2.11)$$

ilk terim “mıknatıslama momenti” ve ikinci terim “relüktans momenti” olarak isimlendirilmektedir.

Mekanik kısmına ilişkin moment ifadesi ise;

$$T_e = T_L + B \cdot \omega_m + J \frac{d(\omega_m)}{dt} \quad (2.12)$$

olarak yazılabilmektedir.  $T_L$ ; yük momentini,  $B$ ; sönüm katsayısını ve  $J$ ; eylemsizlik momentini ifade etmektedir. DMSM'nin elektrik ve mekanik kısmına ilişkin denklemler aşağıda tanımlanmaktadır.

$$\frac{d(i_d)}{dt} = \frac{v_d - r_s \cdot i_d + \omega_r \cdot L_q \cdot i_q}{L_d} \quad (2.13)$$

$$\frac{d(i_q)}{dt} = \frac{v_q - r_s \cdot i_q - \omega_r \cdot (L_d \cdot i_d + \lambda_m)}{L_q} \quad (2.14)$$

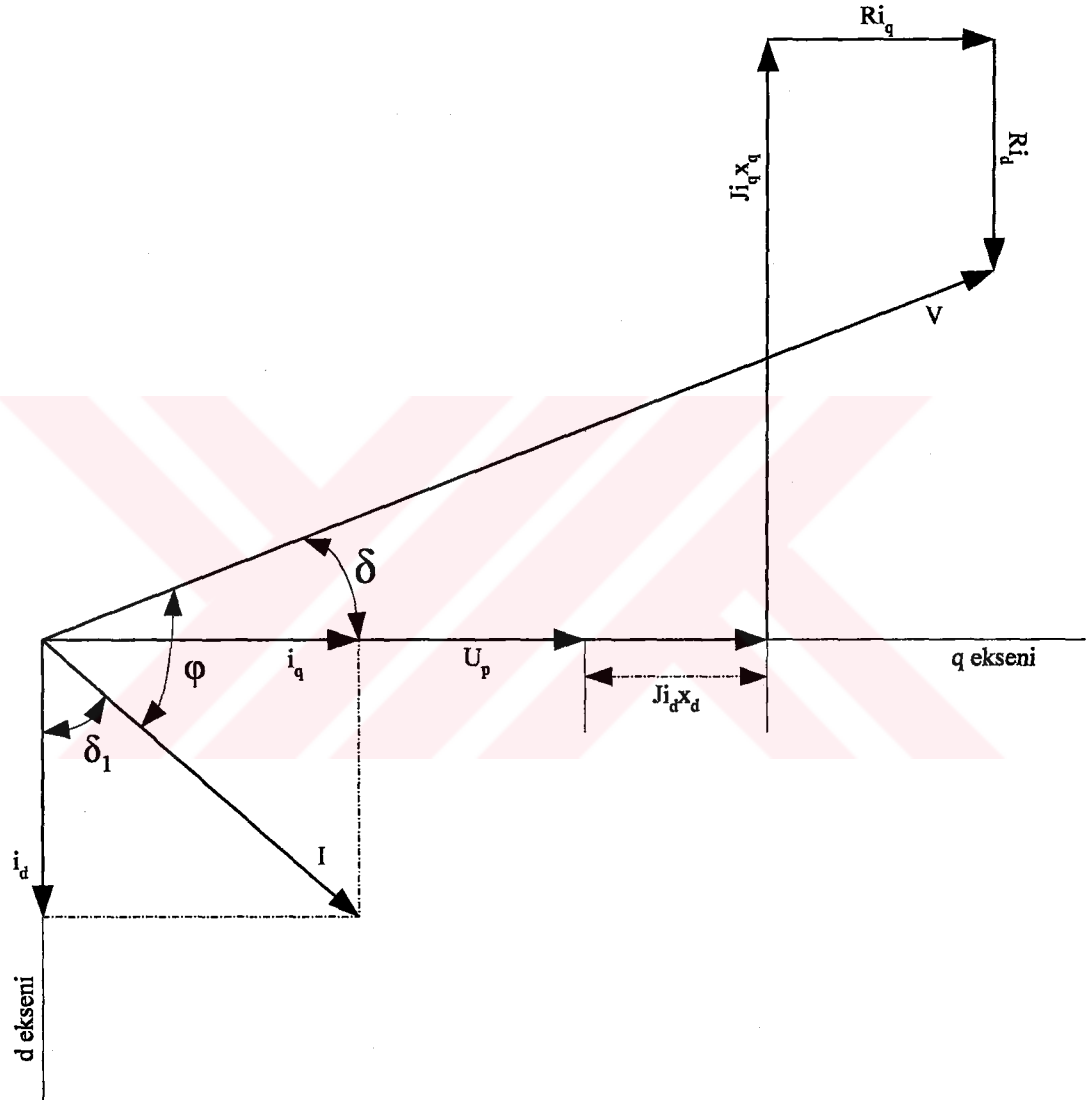
$$\frac{d(\omega_m)}{dt} = \frac{T_e - T_L - B \cdot \omega_m}{J} \quad (2.15)$$

olarak ifade edilir. Bu bölümde, a-b-c faz sistemi yerine, park dönüşümü olarak tanımlanan yöntemle elde edilen ve eşdeğer d-q-0 sistemine dönüştürülen matematiksel model kullanılmaktadır. (2.1), (2.9), (2.11), (2.13), (2.14), (2.15), (2.16) ve (2.20) numaralı denklemler kullanılarak Matlab programında DMSM'nin durum uzay modeli oluşturulmaktadır. Oluşturulan modelin blok diyagramı Şekil 2.6'da verilmektedir. Elde edilen matematiksel modelde ters dönüşüm metodu kullanılarak d-q eksenindeki çıkış değerleri a-b-c faz sistemine dönüştürülmektedir. Böylece gerçek sistemdeki değerler elde edilmiş olur. Buna göre d-q ekseninde elde edilen çıkış büyüklüklerinden  $i_q$  ve  $i_d$  akımları denklem (2.16)'da görülen ters dönüşüm matrisi kullanılarak  $i_a$ ,  $i_b$  ve  $i_c$  akımlarına dönüştürülmektedir [13].

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \sin(\theta_r) & 1 \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

### 2.3. Daimi Mıknatıslı Senkron Motorun Fazör Diyagramı

İncelenen DMSM'nin fazör diyagramı Şekil 2.5'de görüldüğü gibidir. Fazör diyagramı d ve q eksen bileşenlerine göre çizilmiştir [3].

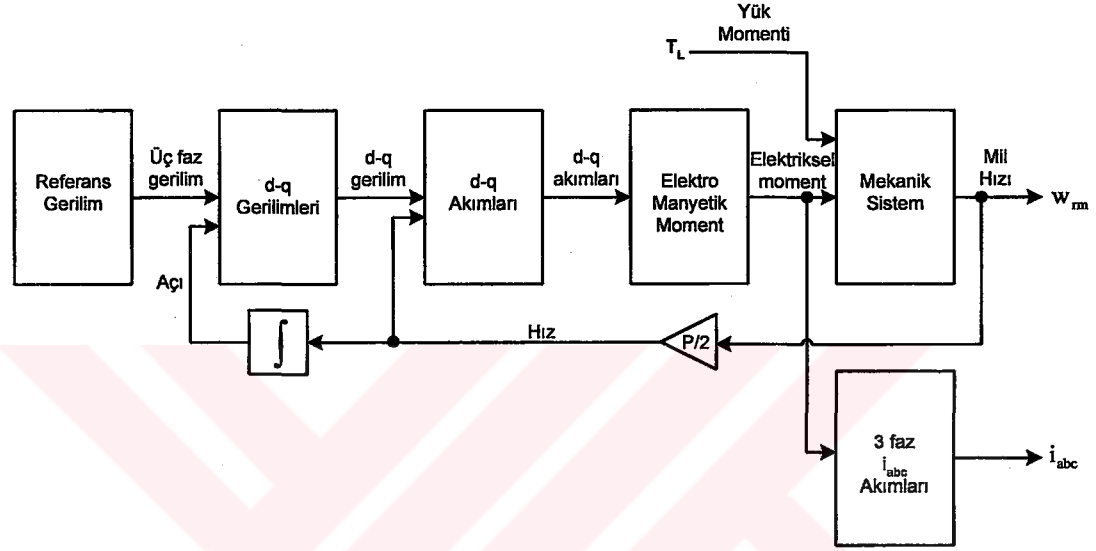


Şekil 2.5. DMSM'nin fazör diyagramı.

Şekil 2.5'de,  $x_d$ ; d eksen reaktansını,  $x_q$ ; q eksen reaktansını,  $\delta$ ; yük açısını,  $\delta_1$ ; moment açısını,  $\varphi$ ; güç faktör açısını ve  $U_p$ ; kutup tekerleği gerilimini ifade etmektedir.

## 2.4. Dinamik Simülasyon

Bu bölümde motorun modeli oluşturularak Matlab/Simulink paket programında gerçekleştirilmektedir. Matematiksel modeli oluşturulan DMSM'nin blok diyagramı Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6. DMSM'nin blok diyagramı.

### 2.4.1. Referans gerilim bloğu

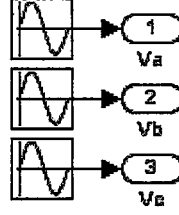
Referans gerilim bloğunun oluşumunda denklem (2.17), (2.18) ve (2.19) kullanılarak, aralarında  $120^\circ$  faz farkı olan üç faz gerilim bloğu elde edilmektedir;

$$v_a = v_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_{ref}) \quad (2.17)$$

$$v_b = v_m \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f_{ref} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad (2.18)$$

$$v_c = v_m \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f_{ref} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad (2.19)$$

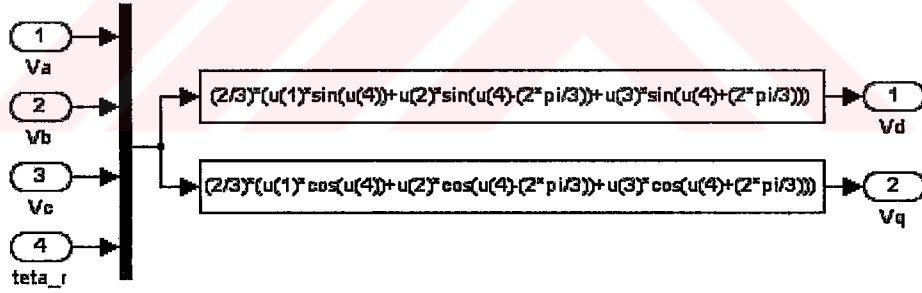
$f_{ref}$ ; referans frekans,  $v_m$ ; gerilimin tepe değeridir. Bu denklem takımına göre Simulink programında elde edilen gerilim bloğu Şekil 2.7’de görülmektedir;



Şekil 2.7. Üç faz gerilimin oluşturulması.

#### 2.4.2. d-q gerilim bloğu

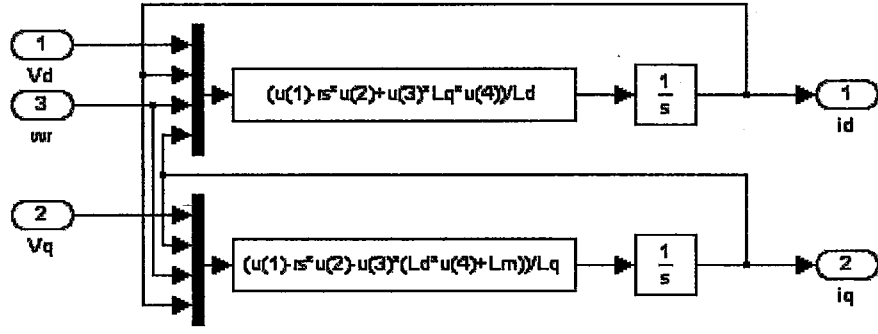
Şekil 2.3’de görüldüğü gibi d-q gerilimleri rotor pozisyonuna göre hesaplanır ve d-q eksenini rotor belirler. Bu blok denklem (2.1)’e göre oluşturulmaktadır ve Şekil 2.8’de Simulink modeli görülmektedir;



Şekil 2.8. d-q gerilim bloğu.

#### 2.4.3. d-q akı ve akım bloğu

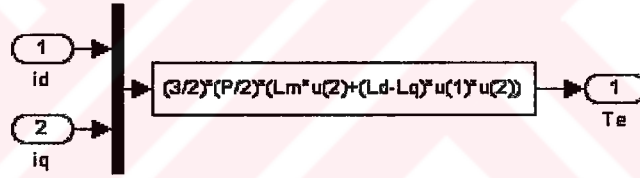
(2.13) ve (2.14) denklemleri kullanılarak  $i_d$  ve  $i_q$  akımları bloğu oluşturulur. Simulink modeli Şekil 2.9’da görülmektedir;



Şekil 2.9.  $i_d$  ve  $i_q$  akımları bloğu.

#### 2.4.4. Elektromanyetik moment bloğu

(2.11) denkleminde yararlanılarak elektromanyetik moment bloğu oluşturulmaktadır. Simulink modeli Şekil 2.10'da görülmektedir;

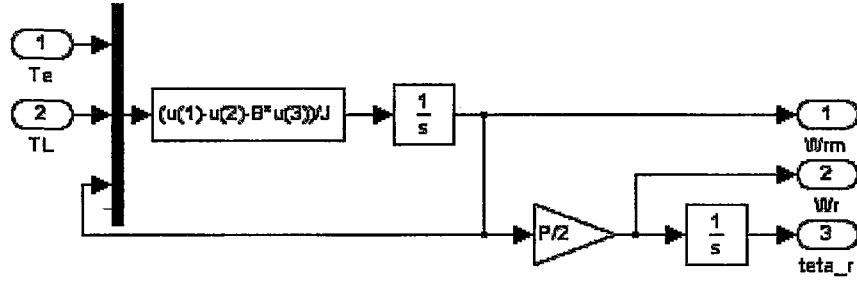


Şekil 2.10. Elektromanyetik moment bloğu.

#### 2.4.5. Mekanik sistem bloğu

Denklem (2.9), (2.15) ve (2.20)'deki eşitliklerden yararlanılarak mekanik sistem bloğu oluşturulmaktadır. Simulink modeli Şekil 2.11'de görülmektedir;

$$\frac{d(\theta_r)}{dt} = \frac{P}{2} \omega_{mm} \quad (2.20)$$



Şekil 2.11. Mekanik sistem bloğu.

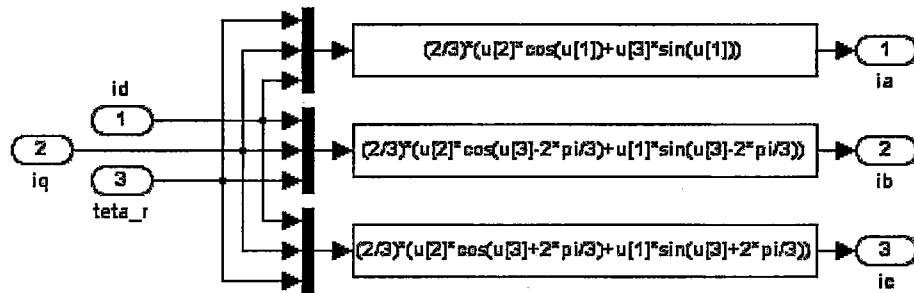
#### 2.4.6. Üç faz $i_{abc}$ akım bloğu

Denklem (2.21), (2.22) ve (2.23)'den yararlanarak sistemin  $i_{abc}$  akım bloğu elde edilebilir. Simulink modeli Şekil 2.12'de görülmektedir;

$$i_a = \frac{2}{3} [i_q \cdot \cos(\theta) + i_d \cdot \sin(\theta)] \quad (2.21)$$

$$i_b = \frac{2}{3} \left[ i_q \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_d \cdot \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (2.22)$$

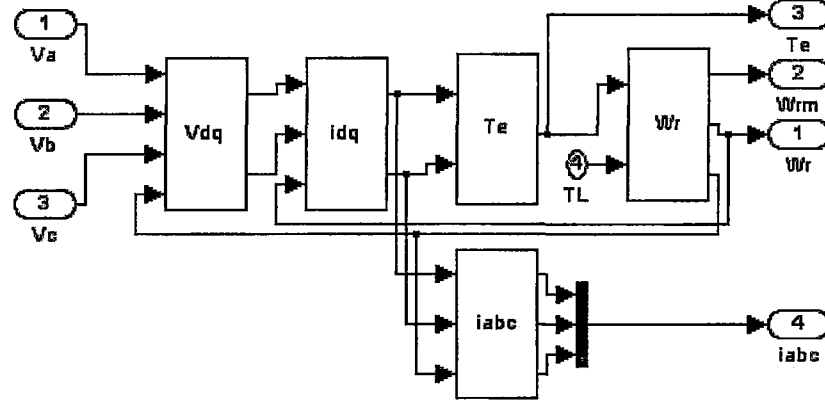
$$i_c = \frac{2}{3} \left[ i_q \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_d \cdot \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (2.23)$$



Şekil 2.12.  $i_{abc}$  akım bloğu.

#### 2.4.7. Motorun toplam matematiksel modeli

Sistemin toplam matematiksel modeli Şekil 2.13’de görülmektedir.



Şekil 2.13. DMSM’nin toplam matematiksel modeli.

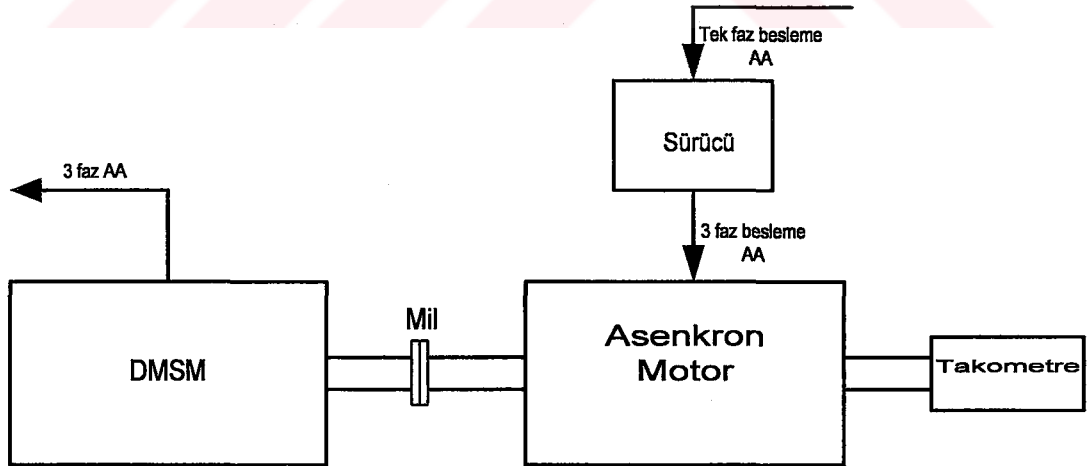
Simülasyon yapılmadan önce motor parametreleri tespit edilmekte ve daha sonra modern denetim yöntemleri kullanılarak hız analizi gerçekleştirilmektedir.

### BÖLÜM 3. MOTOR PARAMETRELERİNİN ÖLÇÜLMESİ

DMSM'nin hız denetimi için gerekli olan parametreler aşağıdaki gibidir;

- $P$  : Çift kutup sayısı
- $r_s$  : Faz başına stator sargı direnci
- $L_d, L_q$  : Rotor d-q eksenli endüktansları
- $\lambda_m$  : Uyarma akısı
- $B$  : Sönüm katsayısı
- $J$  : Eylemsizlik momenti

Parametrelerin ölçülebilmesi için Şekil 3.1'de görülen deney düzeneği kurulmuştur. DMSM'nin miline asenkron motor bağlanarak, sürücü ile asenkron motorun hız ayarı yapılmaktadır.



Şekil 3.1. DMSM parametrelerinin ölçülmesi için kurulan deney düzeneği blok diyagramı.

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi DMSM, asenkron motor miline akuple bağlanarak generatör gibi çalıştırılmakta ve mil hızı takometre ile ölçülmektedir.

### 3.1. Kutup Sayısının Ölçülmesi (P)

Asenkron motor çalıştırılmakta ve DMSM rotor hızı 1000 dev/dak'da döndürülerek, daimi mıknatıslar tarafından üretilen gerilimin frekansı ölçülerek elektriksel hız denklem (3.1)'den hesaplanmaktadır ( $\omega_r \cong 314$  rad/s);

$$f_r = 50 \text{ Hz}$$
$$\omega_r = 2 \cdot \pi \cdot f_r \quad (3.1)$$

denklem (3.1)'de,  $f_r$ ; elektriksel frekansı ifade etmektedir. Takometre yardımı ile motor mil hızı ölçülerek, motorun kutup sayısı denklem (2.9)'dan elde edilmektedir ( $P=6$ ).

### 3.2. Stator Faz Sargı Direncinin Ölçülmesi ( $r_s$ )

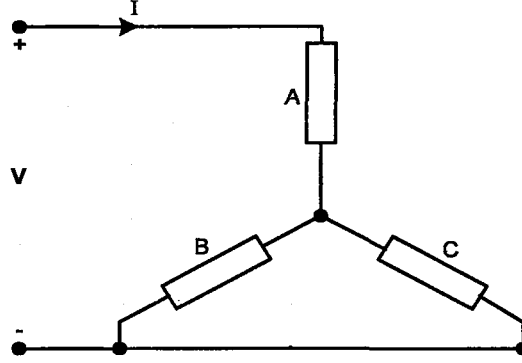
Yıldız bağlı DMSM'nin faz-faz arası direnci ölçülmekte, elde edilen değer yarısı faz-nötr arasındaki stator direncini vermektedir. Çok küçük güçlü DMSM'lerde deri etkisi belirgin değildir, bu nedenle ihmal edilebilir. Sargı direnci değeri sıcaklığa bağlıdır.  $T_0$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) sargı sıcaklığında,  $R_0$  ( $\Omega$ ) sargı direnci ölçülerek kaydedilir ve diğer  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) sıcaklık değerinde ise  $r_s$  direnci aşağıdaki formülden hesaplanır [17]:

$$r_s = R_0 \cdot (K + T) / (K + T_0) \quad (3.2)$$

denklem (3.2)'de,  $K$ ; bakır metal için belirlenen sabittir (bakır için,  $K=234.5$ ). Bu uygulamada stator sargı direnç değeri, oda sıcaklığında yapılan ölçümler sonucu elde edilmektedir ( $r_s = 5.25 \Omega$ ).

### 3.3. Senkron Endüktansların Ölçülmesi ( $L_d$ ve $L_q$ )

$L_d$  ve  $L_q$  endüktans değerlerinin ölçülmesinde dijital RLC metre kullanılmaktadır. Ölçüm için Şekil 3.2’de görülen bağlantı yapılmıştır.



Şekil 3.2.  $L_d$  ve  $L_q$  endüktans değerlerinin ölçülmesi için bağlantı şeması.

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi DMSM yıldız bağı ve nötr ucu bulunmamaktadır.  $L_d$  ve  $L_q$  endüktans değerleri denklem (3.3)’den hesaplanarak elde edilmektedir.

$\theta_r = 0^\circ$  iken,  $L = 17.74$  mH ölçülerek,  $L_q = 11.83$  mH hesaplama sonucu elde edilmiştir.

$\theta_r = 30^\circ$  iken,  $L = 19.95$  mH ölçülerek,  $L_d = 13.3$  mH hesaplama sonucu elde edilmiştir.

$$L_q = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot L (\theta_r = 0^\circ), \quad L_d = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot L (\theta_r = 30^\circ) \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)’de,  $L$ ; deney sonucu ölçülen eşdeğer endüktansı ifade etmektedir.

### 3.4. Daimi Mıknatıs Akısının Ölçülmesi ( $\lambda_m$ )

Daimi mıknatısın akı bağıntısı, yüksüz durumda motor mili sabit hızla döndürüldüğünde, motorun faz-faz etkin gerilimi  $V_{rms}$  ölçülerek,  $\lambda_m$  elde edilebilir. Sürücü ve asenkron motor aracılığı ile DMSM'nin mili 1000 d/dak'da sabit hızda döndürülerek, DMSM'nin faz-faz etkin gerilim değeri ölçülür ve denklem (3.4) ile mıknatıslama akısı elde edilir ( $\lambda_m = 0.09653$  Wb);

$$\omega_r = 314 \text{ rad/s}$$

$$V_{rms} \cong 39 \text{ Volt}$$

$$\lambda_m = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_{rms}}{\omega_r} \quad (3.4)$$

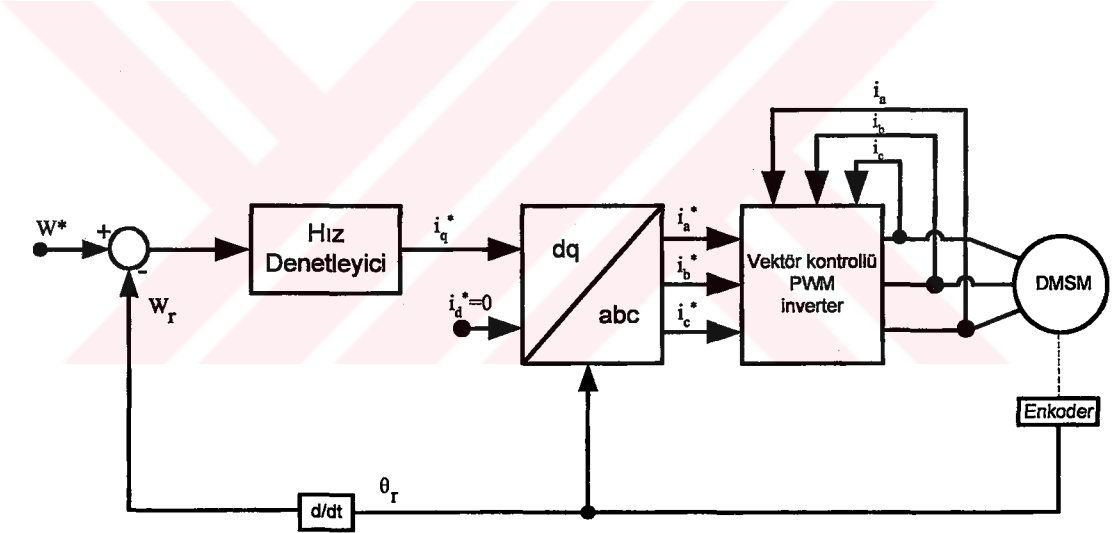
denklem (3.4)'de,  $V_{rms}$ ; faz-faz gerilim etkin değerini göstermektedir [17]. B ve J değerleri, motor üretici firmasının verdiği katalogdan alınmıştır. Deneyler ve hesaplamalar sonucu elde edilen DMSM parametreleri Tablo 3.1'de verilmektedir. Bölüm 4'de, Şekil 4.1'de görülen hız denetleyici bloğunda ayrı ayrı yerine konularak kullanılan, PI, BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyicilerin tasarımları açıklanmaktadır.

Tablo 3.1. DMSM parametreleri.

V (V)	530
f (Hz)	50
P	6
$r_s$ ( $\Omega$ )	5.25
$L_d$ (mH)	11.83
$L_q$ (mH)	13.3
$\lambda_m$ (Wb)	0.09653
B (Nm/(rad/s))	0.00014324
J ( $\text{kgm}^2$ )	0.000054
$T_L$ (Nm)	0.83

## BÖLÜM 4. MODERN DENETİM YÖNTEMLERİ

Bu bölümde simülasyonlarda kullanılan PI, BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyicilerin tasarımlarına yer verilmiştir. PI denetleyici katsayıları ve BM temelli denetleyicilerin giriş ve çıkış ölçeklendirme faktörleri, kullanılan motor parametrelerine göre ayarlanmıştır. ÖABMPI denetleyicide giriş ölçeklendirme faktörleri sabit tutularak mümkün olan en iyi performansa ulaşabilmek için çıkış ölçeklendirme faktörleri ayarlanmıştır. Şekil 4.1'de görülen hız denetleyici bloğunda kullanılan PI, BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyicilerin matematiksel modelleri alt başlıklarda açıklanmaktadır.



Şekil 4.1. DMSM hız denetimi blok diyagramı.

### 4.1. PI Denetleyici

PI denetleyici Şekil 4.2'de görüldüğü gibi orantı ve integral denetleyici etkilerinin birleşiminden oluşmaktadır. PI denetim yapısı;

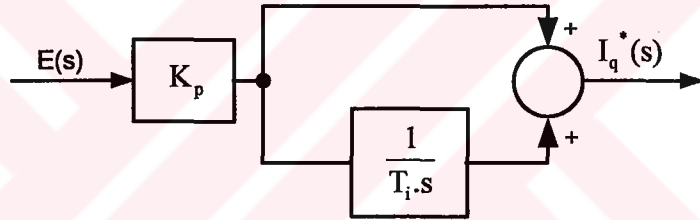
$$i_q^*(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (4.1)$$

$$i_q^*(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{K_i}{K_p} \int_0^t e(t) dt \right] \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilir [18] ve denetim organı çıkışı  $i_q^*(t)$ , hata  $e(t)$ 'nin zaman integrali ile orantılıdır. Burada  $K_i$  integral etki kazancı,  $K_p$  orantı kazancı ve  $T_i = K_p/K_i$  integral etki zamanıdır. PI denetleyicinin transfer fonksiyonu ise;

$$\frac{I_q^*(s)}{E(s)} = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right] \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilir.  $K_p$  ve  $K_i$  sırasıyla, 0.082 ve 21.8 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.2. PI denetleyici blok şeması.

#### 4.2. Bulanık Mantığın Tarihsel Gelişimi

Bulanık mantık (Fuzzy Logic) kavramı ilk kez 1965 yılında California Berkeley Üniversitesinden Prof. Lotfi A.Zadeh'in bu konu üzerinde ilk makalelerini yayınlamasıyla duyuldu. O tarihten sonra önemi gittikçe artarak günümüze kadar gelen bulanık mantık, belirsizliklerin anlatımı ve belirsizliklerle çalışılabilmesi için kurulmuş bir matematik düzen olarak tanımlanabilir. Bilindiği gibi istatistikte ve olasılık kuramında, belirsizliklerle değil kesinliklerle çalışılır ama insanın yaşadığı ortam daha çok belirsizliklerle doludur. Bu yüzden insanoğlunun sonuç çıkarabilme yeteneğini anlayabilmek için belirsizliklerle çalışmak gereklidir [6].

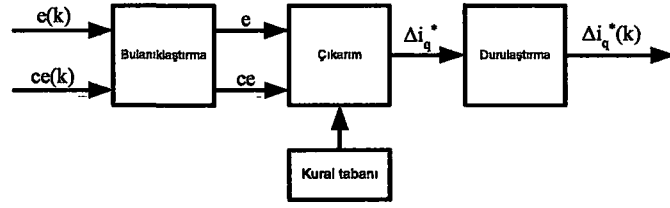
Bulanık mantığın ilk uygulaması, Mamdani tarafından 1974 yılında bir buhar makinesinin bulanık denetiminin gerçekleştirilmesi ile olmuştur. 1980 yılında bir Hollanda şirketi çimento fırınlarının denetiminde bulanık mantık denetimi uygulamıştır. Üç yıl sonra Fuji Elektrik şirketi su arıtma alanları için kimyasal püskürtme aleti üzerine çalışmalar yapmıştır. 1987'de ikinci IFSA kongresinde ilk bulanık mantık denetleyicileri sergilenmiştir. Bu denetimler 1984 yılında araştırmalara başlayan Omron şirketinin 700'den fazla yaptığı uygulamaları içermektedir. 1987 yılında ise Hitachi takımının tasarladığı Japon Sendai metrosu denetleyicisi çalışmaya başlamıştır. Bu bulanık mantık denetim metroda daha rahat bir seyahat, düzgün bir yavaşlama ve hızlanma sağlamıştır. 1989 yılında Omron şirketi Japonya'nın Harumi şehrinde bulunan çalışma merkezinde yapmış olduğu bulanık sonuç-board'la yapılan depolama tekrar etme ve bulanık sonuçlarını elde etmek için kullanılan (RISC) bilgisayara dayalı olan çalışmaları tanıtmıştır. Bulanık kuramının uygulamalarının ürünleri Japonya'da 1990 yılında tüketicilere sunulmuştur [6].

Günümüzde ise, birçok ürünün işleyişi bulanık mantığa dayanmaktadır. Bulanık mantık denetim sistemlerinin çoğu Japonya'da üretilmektedir. Özellikle bulanık işlem denetleyici (fuzzy process controller) olarak isimlendirilen özel amaçlı bulanık mantık mikroişlemci yongasının üretilmesine çalışılmaktadır. Bu teknoloji fotoğraf makineleri, çamaşır makineleri ve klimalar gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bundan başka uzay araştırmaları ve havacılık endüstrisinde de kullanılmaktadır [6].

### **4.3. Bulanık Mantık Denetleyici**

Bulanık Mantık insanların her gün kullandığı ve davranışlarının yorumlandığı yapıya ulaşılmasını sağlayan matematiksel bir disiplindir. İnsanlar günlük hayatta; tam olarak tanımlanmamış ve nümerik olmayan dilsel niteleyiciler (soğuk, hafif soğuk, ılık, sıcak, çok sıcak vb. gibi) kullanarak kararlar verir ve problemlerini çözerler. Bulanık mantık denetimde, sistemlerin matematik ile tanımlanmasına gerek yoktur. Bulanık mantık uygulamalarında kullanılan kuralların, o konuyla ilgili uzman kişilerin deneyimlerine dayalı olarak oluşturulur.

Bulanık mantık denetleyici iç yapı blok şeması Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. BM denetleyici iç yapısı.

#### 4.3.1. Bulanıklaştırma (Fuzzification)

Bulanıklaştırma, sayısal veriler üzerinde ölçek değişikliği yaparak bunu bulanık veriler biçimine dönüştürmektedir. Bu ünite, işlevini bulanık kümeleri kullanarak gerçekleştirmektedir. Bulanık kümeler ise üyelik fonksiyonları ile temsil edilmektedir. Her üyelik fonksiyonlarının dilsel etiketleri “Pozitif Büyük, Pozitif Orta, Pozitif Küçük, Sıfır, Negatif Büyük, Negatif Orta, Negatif Küçük” gibi bir küme biçiminde olabilir. Uygulamada en sık kullanılan üyelik fonksiyonları üçgen, sigmoid ve yamuk tipi fonksiyonlar olarak verilmektedir [1].

#### 4.3.2. Durulaştırma (Defuzzification)

Durulaştırma ünitesinin görevi, çıkarım ünitesinden gelen bulanık kontrol işaretini sayısal değere dönüştürmektedir. Bulanık kontrol stratejisinde kullanılan durulaştırma yöntemleri olarak; merkez yöntemi, ağırlık merkezi yöntemi ve geniş alan merkezi yöntemi gibi değişik yöntemler verilmektedir. Bunlardan en sık kullanılanı ağırlık merkezi yöntemidir [12].

Bu çalışmada durulaştırma yöntemi olarak ağırlık merkezi yöntemi kullanılmaktadır. Ağırlık merkezine göre keskin değerlerin hesaplaması denklem (4.4)’deki gibi yapılarak durulaştırma algoritması gerçekleştirilmektedir.

$$\Delta i_q^*(k) = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta i_q^*)_i \mu[(\Delta i_q^*)_i]}{\sum_{i=1}^n \mu[(\Delta i_q^*)_i]} \quad (4.4)$$

#### 4.3.3. Kural tabanı (Rule base)

Sistem girişleri ve çıkışlarında kullanılmak üzere bulanık kümeler tanımlanmaktadır. Bulanık sistemin kurulması için bazı kuralların verilmesi gerekmektedir. Bu kuralların şekli:

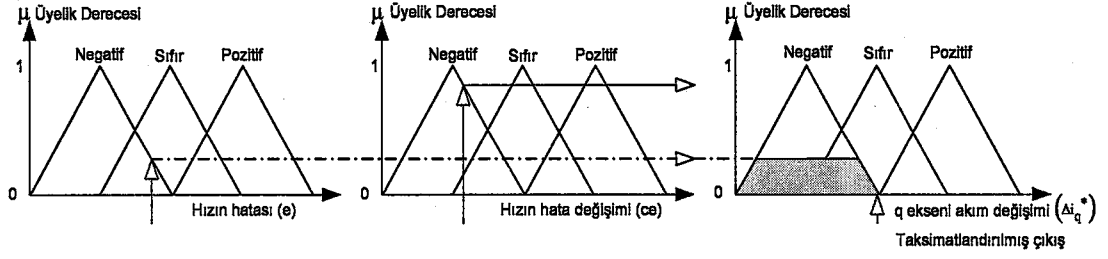
EĞER	(IF)	→ Birinci giriş değeri
VE	(AND)	→ İkinci giriş değeri
O HALDE	(THEN)	→ Çıkış değeri

Olarak verilmektedir. Geleneksel mantıktan farklı olarak, bulanık mantıktaki EĞER-O-HALDE kuralları ile “çok hızlı ya da çok yavaş” ifadelerine sahip önermeleri bulunan bulanık kurallar kesinlikten uzak ve esnektir.

#### 4.3.4. Çıkarım (Inference)

Çıkarım ünitesi (inference engine), bulanıklaştırma ünitesinden gelen bulanık değerleri, kural tabanındaki kurallar üzerinde uygulayarak sonuca varmaya “çıkarım” denmektedir.

Bulanık sistemlerde girişler, hızlı, sıcak gibi dilsel değişkenlerden oluştuğundan dolayı, girişler hakkında karar verme EĞER-O HALDE şeklinde kuralların kullanılması ile çıkış değeri belirlenmektedir. Bu işlem VE tipi bulanık çıkarım yapısı kullanılarak Şekil 4.4’deki gibi yapılmaktadır.

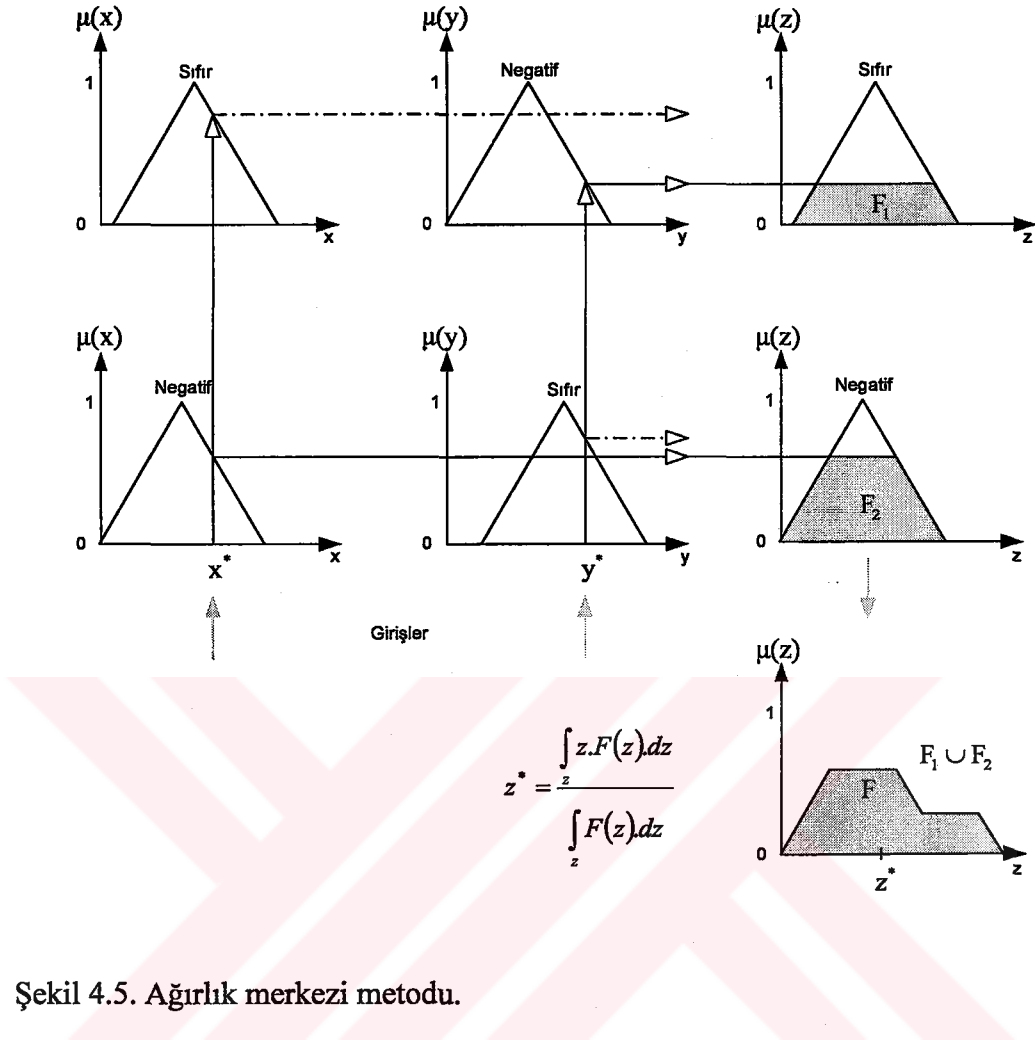


Şekil 4.4. VE tipi bulanık çıkarım.

Şekil 4.4’de sistem hız değişimi ve hızın hata değişimi olmak üzere iki giriş değişkenine ve motor q eksenli akımı adı altında çıkış değişkenine sahiptir. Kuralı ise; “EĞER hızın hatası (e) negatif VE hızın hata değişimi (ce) negatif ise, O HALDE motor q eksenli akımı değişimi ( $\Delta i_q^*$ ) negatif”tir”.

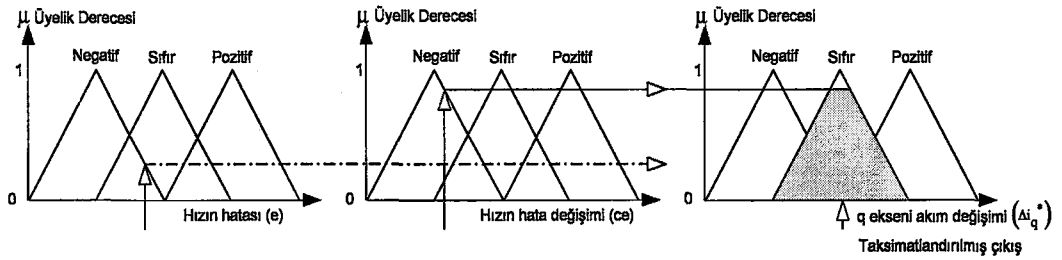
Genel olarak, bulanık sisteme gelen hız hatası, hızın hata değişimi okunur ve motor q eksenli akımı olarak atışlenen kurallar ile ilişkili bir çıkış değeri belirlenir. Kuralda uygulanan test eğer VE ise o zaman çıkış, girişin minimum üyelik derecesine göre ölçeklendirilmiştir.

Bu çalışmada çıkış değeri, Şekil 4.5’deki gibi Min-Max çıkarım kullanılarak, ağırlık merkezi yönteminin uygulanması ile bulunmaktadır. Şekil 4.5’de,  $x^*=e(k)$ ,  $y^*=ce(k)$  giriş keskin değerlerini ve  $z^*=\Delta i_q^*$  çıkış keskin değerini ifade etmektedir [27].



Şekil 4.5. Ağırlık merkezi metodu.

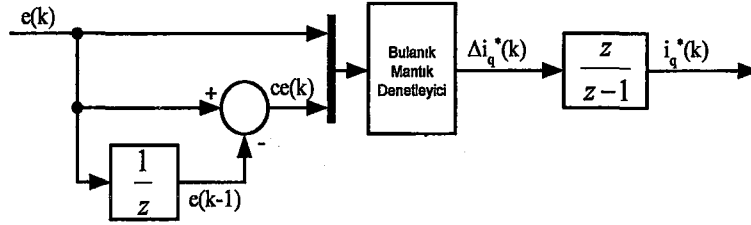
Şekil 4.6’da VEYA testi uygulanmaktadır. Bu testte çıkış değeri giriş üyelik derecesinin maksimum değerine göre derecelendirilir. Giriş değişkenlerinin üyelik derecesine göre, orta bulanık kümenin çıkış değişkenleri ölçeklendirilmiştir ve atışlenen kural “EĞER hızın hatası (e) negatif VEYA hızın hata değişimi (ce) negatif ise, O HALDE motor q eksenini akımı değişimi ( $\Delta i_q^*$ ) sıfır’dır”.



Şekil 4.6. VEYA tipi bulanık çıkarım.

#### 4.3.5. Bulanık mantık hız denetleyici bloğu

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi BM denetleyicinin yapısı incelendiğinde, denetleyicinin iki girişi bulunmaktadır; hız hatası  $e(k)$  ve hız hatasındaki değişim  $ce(k)$ ’dir [27]. Aynı zamanda, referans faz akımı olan  $i_q^*(k)$ ’daki değişimi ifade eden  $\Delta i_q^*(k)$  çıkış değişkeni bulunmaktadır.



Şekil 4.7. BM denetleyici yapısı.

Hız hatası ve hız hatasındaki değişim her örnekleme zamanı için denklem (4.5) ve (4.6)’daki gibi hesaplanmaktadır:

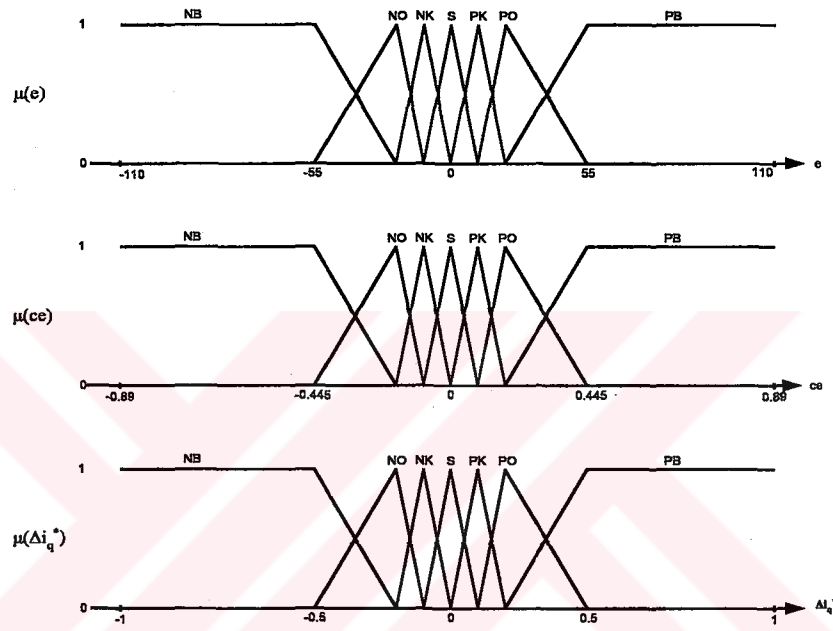
$$e(k) = \omega^*(k) - \omega_r(k) \quad (4.5)$$

$$ce(k) = e(k) - e(k-1) \quad (4.6)$$

Burada,  $\omega^*(k)$ ; referans hız ve  $\omega_r(k)$ ; gerçek hız değerini ifade etmektedir.

BM denetleyici ilk olarak, Şekil 4.8’de gösterilen üçgen üyelik fonksiyonları kullanılarak,  $e(k)$  ve  $ce(k)$  keskin değişkenleri,  $e$  ve  $ce$  bulanık değişkenlerine dönüştürülmektedir.  $e$  ve  $ce$  bulanık değişkenlerin ölçeklendirme faktörleri sırası ile (-110, 110) rad/s ve (-0.89, 0.89) rad/s’dir. Çıkış değişkeni ölçeklendirme faktörü  $\Delta i_q^*$  ise, (-1, 1) A’dir. Evrensel dilde yedi bulanık değişken kullanılmaktadır: negatif büyük (NB), negatif orta (NO), negatif küçük (NK), sıfır (S), pozitif küçük (PK), pozitif orta (PO) ve pozitif büyük (PB)’dir. Her bulanık değişken sıfır ile bir arasında değişmekte olan üyelik ( $\mu$ ) derecesinin alt kümesinin bir üyesidir.

BM denetleyici ikinci olarak, çıkarım biriminin girişi olan bulanık değişkenler  $e$  ve  $ce$ 'ye bağlı olarak, Tablo 4.1'de görülen, 49 adet denetim kurallarını yürütmekte ve elde edilen  $\Delta i_q^*$  büyüklüğünü durulama biriminde işlemektedir. Bu kurallar, kontrol mühendislerinin deneyimleri ve DMSM'nin davranış bilgilerine dayanılarak elde edilmiştir. Her kural verilen örnekteki gibi işlem yürütmektedir: "EĞER  $e$  PK VE  $ce$  NO ise, O HALDE  $\Delta i_q^*$  NK".



Şekil 4.8.  $e$ ,  $ce$  ve  $\Delta i_q^*$  bulanık değişkenlerinin üyelik fonksiyonları.

Tablo 4.1. Hız denetimi için bulanık denetim kuralları.

		Hata "e"						
		NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
Hata değişimi "ce"	NB	NB	NB	NB	NB	NO	NK	S
	NO	NB	NB	NB	NO	NK	S	PK
	NK	NB	NB	NO	NK	S	PK	PO
	S	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
	PK	NO	NK	S	PK	PO	PB	PB
	PO	NK	S	PK	PO	PB	PB	PB
	PB	S	PK	PO	PB	PB	PB	PB

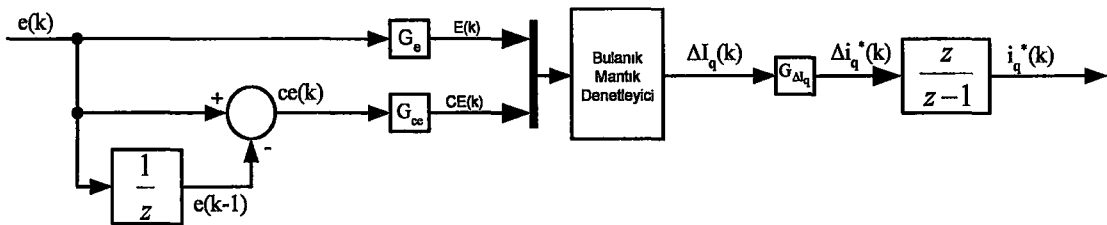
Şekil 4.3’de görüldüğü gibi, Durulaştırma bölümünde  $\Delta i_q^*$  değeri, motor çıkış keskin değeri olan  $\Delta i_q^*(k)$  keskin değerine dönüştürülür. Literatürde değişik durulaştırma algoritmaları önerilmektedir [25]. Burada,  $\Delta i_q^*$  üyelik fonksiyonunun ağırlık merkezine göre keskin değerler hesaplaması denklem (4.4)’deki gibi yapılarak durulaştırma algoritması gerçekleştirilmektedir.

Vektör denetim için referans akım  $i_q^*(k)$ ,  $\Delta i_q^*(k)$ ’nin integrali alınarak denklem (4.7) ile elde edilmektedir:

$$i_q^*(k) = i_q^*(k-1) + \Delta i_q^*(k) \quad (4.7)$$

#### 4.4. Bulanık Mantık PI Denetleyici

Bulanık mantık denetleyicide olduğu gibi BMPI denetleyicide de (7x7) kural tabanını oluşturan denetim kuralları ve Şekil 4.10’da gösterilen üçgen üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. E ve CE bulanık değişkenlerinin ölçeklendirme faktörleri (-1, 1) rad/s’dir. Çıkış değişkeni ölçeklendirme faktörü  $\Delta I_q$  ise, (-1, 1) A’dır. Şekil 4.9’da,  $G_e$ ,  $G_{ce}$  ve  $G_{\Delta I_q}$  ölçeklendirme faktörleridir. Tablo 4.1’de, sırası ile iki giriş ve bir çıkış e, ce ve  $\Delta i_q^*$  denetleyici değişkenlerinin normalleştirilmiş değişkenler olan E(k), CE(k) ve  $\Delta I_q(k)$  için kural tabanları görülmektedir.



Şekil 4.9. BMPI denetleyici yapısı.

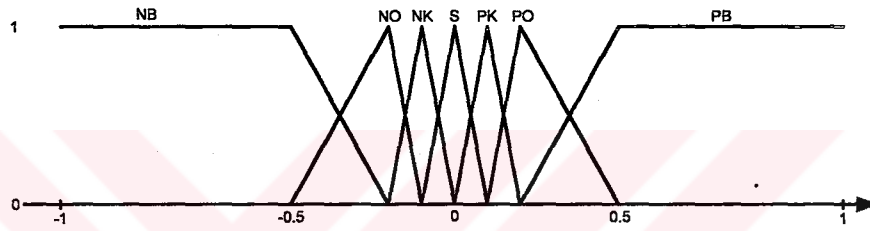
Şekil 4.9'daki BMPI denetleyicinin yapısı;

$$E(k) = e(k).G_e(k) \quad (4.8)$$

$$CE(k) = ce(k).G_{ce}(k) \quad (4.9)$$

$$\Delta i_q^*(k) = \Delta I_q(k).G_{\Delta I_q}(k) \quad (4.10)$$

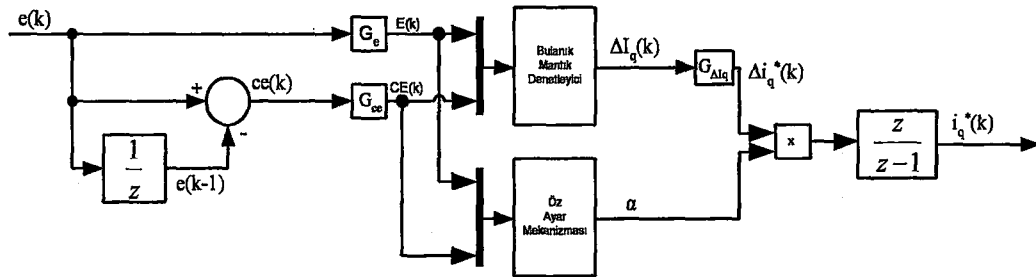
ile ifade edilmektedir.  $G_e$ ,  $G_{ce}$  ve  $G_{\Delta I_q}$  ölçeklendirme faktörleri sırası ile 0.0127, 1 ve 0.37 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.10. E, CE ve  $\Delta I_q$  için üyelik fonksiyonları.

#### 4.5. Öz Ayarlı Bulanık Mantık PI Denetleyici

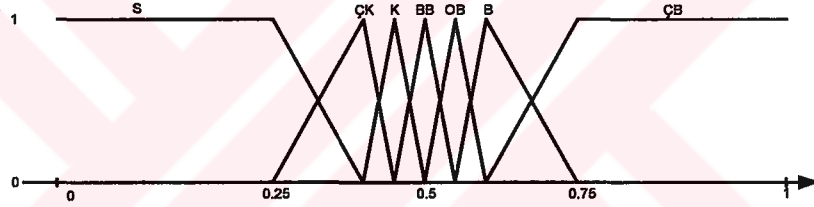
ÖABMPI denetleyici blok diyagramı Şekil 4.11'de gösterilmektedir. BM denetleyicinin çıkışı öz ayar mekanizması tarafından iyileştirilmektedir. Bu mekanizma için gerekli yapı alt başlıklarda anlatılmaktadır.



Şekil 4.11. ÖABMPI denetleyici blok diyagramı.

#### 4.5.1. Üyelik fonksiyonları

Bulanık mantık denetleyici bloğu giriş ölçeklendirme faktörleri  $E(k)$  ve  $CE(k)$ ,  $(-1, 1)$  rad/s ve çıkış ölçeklendirme faktörü  $\Delta I_q(k)$  ise  $(-1, 1)$  A'dir. Aynı zamanda öz ayar mekanizması bloğu giriş  $(E(k), CE(k))$  ve çıkış  $(\alpha)$  üyelik fonksiyonları ölçeklendirme faktörleri,  $(0, 1)$  olarak kullanılmaktadır. BM denetleyici bloğu giriş ve çıkış değişkenleri için, gerekli olan kural tabanları Tablo 4.1'de ve üyelik fonksiyonları ise Şekil 4.10'da görülmektedir. Şekil 4.12'de ise öz ayar mekanizması bloğu için üyelik fonksiyonları görülmektedir. Kazanç yenileme faktörünün belirlenmesi için Tablo 4.2'de görüldüğü gibi  $(7 \times 7)$  denetim kuralları (S; sıfır, ÇK; çok küçük, K; küçük, BB; biraz büyük, OB; orta büyük, B; büyük, ÇB; çok büyük) kullanılmaktadır.



Şekil 4.12. E, CE ve  $\alpha$  için üyelik fonksiyonları.

Tablo 4.2.  $\alpha$ 'nın hesaplanması için bulanık kurallar.

		Hata "e"						
		ÇB	B	OB	BB	K	ÇK	S
Hata değişimi "ce"	ÇB	ÇB	ÇB	ÇB	B	BB	K	S
	B	ÇB	ÇB	B	B	OB	K	ÇK
	OB	ÇB	OB	B	ÇB	ÇK	K	ÇK
	BB	K	BB	OB	S	OB	BB	K
	K	ÇK	K	ÇK	ÇB	B	OB	ÇB
	ÇK	ÇK	K	OB	B	B	ÇB	ÇB
	S	S	K	BB	B	ÇB	ÇB	ÇB

ÖABMPI denetleyici, DMSM'nin hız denetiminde kullanılan diğer denetleyicilerden daha iyi performansa sahip olduğu çalışmalar sonucu ortaya çıkmaktadır. BM denetleyicide, EĞER-O HALDE kuralları belirli sayılarla sınırlandırılmıştır. Bu ise gerekli kontrol denetimlerini yapmak için her zaman yeterli olmayabilir. Buna ek olarak ayarlanan ölçeklendirme faktörleri ve üyelik fonksiyonları istenen kontrol performansı için yeterli olmayabilir. Giriş ve çıkış ölçeklendirme faktörleri veya üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi ve bazen istenen denetim amaçlarını başarmak için denetim kurallarının ayarlanması gibi öz ayarlı bulanık mantık denetleyici çalışmaları yapılmaktadır [10, 14].

#### 4.5.2. Ölçeklendirme faktörleri

Şekil 4.10'da BM denetleyici ve Şekil 12'de öz ayar mekanizması için normalize edilmiş çıkış ve giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları, ölçeklendirme faktörleri sırası ile (-1, 1) ve (0, 1)'de normalize edilerek sınırlandırılmıştır. ÖABMPI denetleyicinin giriş ve çıkış değişkenlerinin ölçeklendirme faktörleri ( $G_e$ ,  $G_{ce}$  ve  $G_{\Delta_i q}$ ) arasındaki bağıntılar denklem (4.8), (4.9) ve (4.11)'de görüldüğü gibi;

$$\Delta i_q^*(k) = \alpha \cdot \Delta I_q(k) \cdot G_{\Delta_i q}(k) \quad (4.11)$$

ifade edilir. Denklem (4.11)'de,  $\alpha$ ; kazanç yenileme faktörüdür. BMPI denetleyicide gerçek çıkış değeri  $G_{\Delta_i q}$  kullanılarak elde edilirken, ÖABMPI denetleyicide ise Şekil 4.11'de görüldüğü gibi çıkış değeri ( $\alpha \cdot G_{\Delta_i q}$ ) kullanılarak elde edilmektedir.  $G_e$ ,  $G_{ce}$  ve  $G_{\Delta_i q}$  için uygun değişkenler sırası ile 0.0091, 1 ve 0.5 olarak belirlenmiştir.

#### 4.5.3. Kural tabanları

BMPI denetleyici kuralları Tablo 4.1'de görüldüğü gibidir. Kazanç yenileme faktörü ( $\alpha$ ) bulanık kurallar kullanılarak hesaplanır.  $\alpha$ 'nın hesaplanması için Tablo 4.2'deki kural tabanı kullanılmaktadır. Bu yapı Tablo 4.1'deki kural tabanı ile birleşiminden tasarlanır. Bunun anlamı,  $\alpha$  için kural tabanının belirlenmesinin BM denetleyici kural

tabanına bağılı olduğu ifade edilmektedir. Tüm denetim performansına bakıldığında, Tablo 4.2 aşağıdaki düşünceler sonucu tasarlanmaktadır [15]:

- Hata (E)'nin çok büyük olduğu ve hata değişimi (CE)'nin ters işaretli olması durumunda, aşma miktarı ve nominal hız değerine ulaşma zamanının küçültülmesi için denetleyici çıkışı ( $\alpha$ ) kazancı, küçük değerlere ayarlanmalıdır. Örneğin; "EĞER e S ve ce OB ise, O HALDE  $\alpha$  ÇK".
- Büyük aşma ve sönümleri önlemek için ayarlanan referans değer civarında, kazançta büyük değişimler olabilir. Örneğin aşma miktarını azaltmak için; "EĞER e BB ve ce B ise, O HALDE  $\alpha$  B" kuralı kullanılmaktadır. Bu kural sistem çıkışını referans noktasına hızla yaklaştırır, fakat referans noktasından yukarıya doğru çok hızlı çıkar. Bu durumda büyük  $\alpha$  değeri, sistemin referans noktasına doğru hızlı hareketinin önüne geçerek, daha küçük bir aşma olmasını sağlayacaktır. Benzer bir şekilde büyük sönümden kaçınmak için örnekteki gibi kurallar yazılabilir; "EĞER e OB ise ve ce K ise, O HALDE  $\alpha$  ÇK". Bu kural ile elde edilen  $\alpha$  kazanç değişimi, aşırı osilasyonların önüne geçerek sistemin ayarlanan referans değere ulaşmasını hızlandırır.
- Ani yük değişimi gibi bozucu etki durumlarında, denetleyici performansını artırmak için, sistem kararlı durum (steady-state)'da iken  $\alpha$  kazancı, yük değişimine göre büyük yapılabilir (örneğin; "EĞER e K ve ce ÇK ise, O HALDE  $\alpha$  B".

$\alpha$ 'nın hesaplanması için gerekli olan kural tabanı, BM denetleyici için hazırlanmış kural tabanına bağılıdır. Sonuç olarak sistem için hazırlanmış BM denetleyici kural tabanında herhangi bir değişiklik yapıldığı zaman,  $\alpha$ 'yı hesaplamak için gerekli olan kural tabanında da değişiklik yapılmalıdır.

#### 4.5.4. Öz ayar mekanizması

Denklem 4.11'de görüldüğü gibi, öz ayar denetleyici kazancı sadece  $G_{\Delta q}$  değil,  $(\alpha \cdot G_{\Delta q})$ 'dir.  $G_{\Delta q}$  değeri BM ve BMPI denetleyicilerde sabittir fakat ÖABMPI denetleyicinin kazancı denetleyici aktif durumda iken sabit kalmaz. Kazanç yenileme

faktörü  $\alpha$ , denetlenen sistemin performansına bağlı olarak her örnekleme periyodunda değiştirilir. Bu değişimin amacı, denetleyiciden beklenen cevabın elde edilmesidir.

Şekil 4.11’de öz ayarlı denetleyici tasarımında  $\alpha$ ’nın sürekli ve doğrusal olmayan değişimi ile oluştuğu görülmektedir. Vurgulanması gereken en önemli nokta,  $\alpha$  herhangi bir sistemin parametresine bağlı değildir. Öz ayar mekanizması tarafından hesaplanan  $\alpha$  değeri, sadece sistemdeki ani değişimlere bağlı olduğundan dolayı sistemden bağımsızdır.

Tasarlanan denetleyicinin ayarlaması için uygulanan adımlar [15];

- Kazanç yenileme faktörü olmadan ( $\alpha=1$ ), denetlenmekte olan DMSM için en iyi performansı elde edecek şekilde ÖABMPI denetleyicinin ölçeklendirme faktörleri ayarlanır. Kuralların en etkili bir şekilde kullanılabilmesi için,  $G_e$  öyle ayarlanmalı ki hata ( $e$ ) giriş bölgesinin tamamını  $(-1, 1)$  olarak kapsamalıdır.  $G_{ce}$  ve  $G_{\Delta_q}$  sistemin tepkisi olabildiğince iyileşinceye kadar düzeltilmelidir. Bu değerlerin ayarlanması için sistem bilgisinden yararlanılır veya deneme yanılma yöntemi kullanılabilir. Bu işlem sonunda, öz ayar yapamayan denetleyici elde edilir.
- Bu aşamada  $\alpha \neq 1$ ’dir ve Tablo 4.2’deki kural tabanı ile hesaplanır. Giriş ölçeklendirme faktörleri  $G_e$  ve  $G_{ce}$  ve çıkış ölçeklendirme faktörü  $G_{\Delta_q}$  başlangıç durumunda en iyi performans için uygun değerlere ayarlanmıştır. Bu değerler motor yüklü kalkındığında veya ani yüklendiğinde BM ve BMPI denetleyicide değişmezken ÖABMPI denetleyicilerde öz ayar yöntemi ile değişmektedir.
- İstenilen sistem çıkış performansına bağlı olarak  $\alpha$  için kural tabanı ayarlanmalıdır. Örnek olarak, yükselme zamanının artmasına karşılık aşma miktarını hızlı bir şekilde düşürmek gerekmektedir. Bu durumda,  $e$ ’nin küçük dilsel etiket değerinde  $\alpha$ ’nın değeri çok küçük olmalıdır. Bu durum şu kural ile sağlanabilir; “EĞER  $e$  K ve  $ce$  OB ise, O HALDE  $\alpha$  ÇK”.

## BÖLÜM 5. DENETİM YÖNTEMLERİNİN PERFORMANS ANALİZİ

### 5.1. Yüksüz Durumda

Motor mili yüksüz durumda sistem çalıştırılmaktadır. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de, referans hız 100 rad/s değerinde elde edilen grafikler görülmektedir. Tablo 5.1’de,  $t_{r0}$ ; açısal hızın yükselme zamanı,  $t_{s0}$ ; açısal hızın nominal değere ulaşma zamanı,  $O_s$ ; aşma miktarı ve  $e_{ss}$ ; kalıcı durum hatası ifade edilmekte ve denetleyicilerden elde edilen sonuçlar görülmektedir.

Tablo 5.2’de; denetleyiciler kendi aralarında yüzdesel (%) olarak karşılaştırılmaktadır. Buna göre; yükselme zamanında PI, açısal hızın nominal değerine ulaşma zamanı bakımından ÖABMPI, aşma miktarı açısından BMPI ve kalıcı durum hatası açısından ise BM diğer denetleyicilere nazaran daha iyi performans göstermektedir.

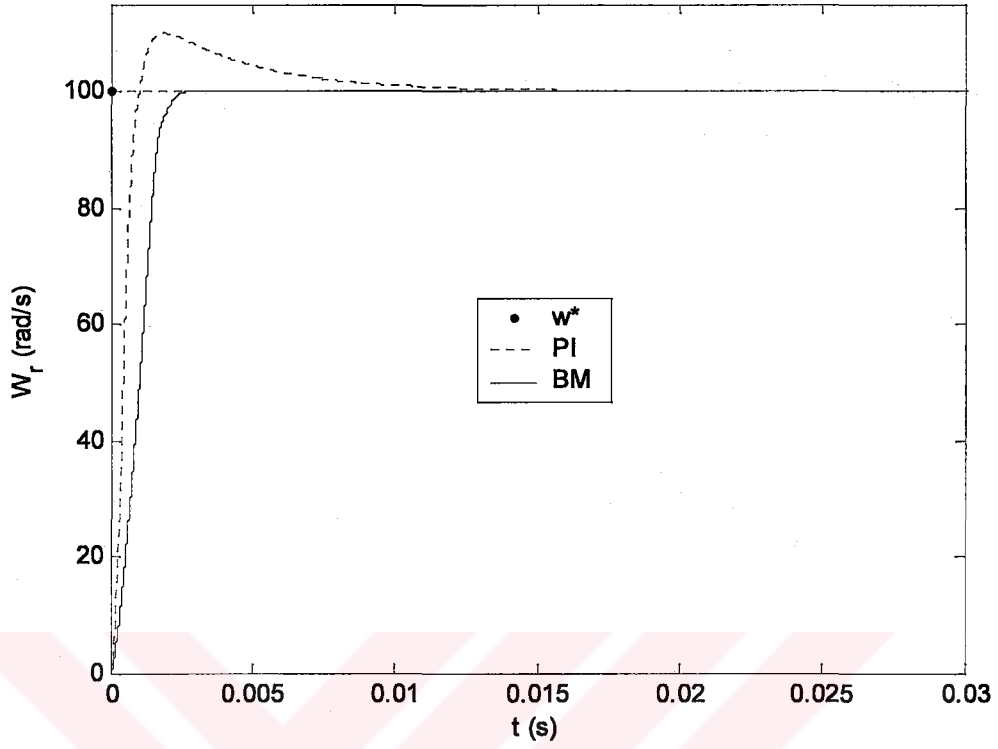
DMSM’nin  $T_L=0$  Nm ile çalışma durumunda: PI denetleyici (Şekil 5.3, Şekil 5.7, Şekil 5.11), BM denetleyici (Şekil 5.4, Şekil 5.8, Şekil 5.12), BMPI denetleyici (Şekil 5.5, Şekil 5.9, Şekil 5.13) ve ÖABMPI denetleyici (Şekil 5.6, Şekil 5.10, Şekil 5.14) ile hız denetimi yapıldığında, sırasıyla  $i_{abc}$  faz akımları,  $T_e$  moment ve  $i_q$  akım değişimleri görülmektedir.

Tablo 5.1. DMSM yüksüz durumda denetleyicilerin hız performans analizi.

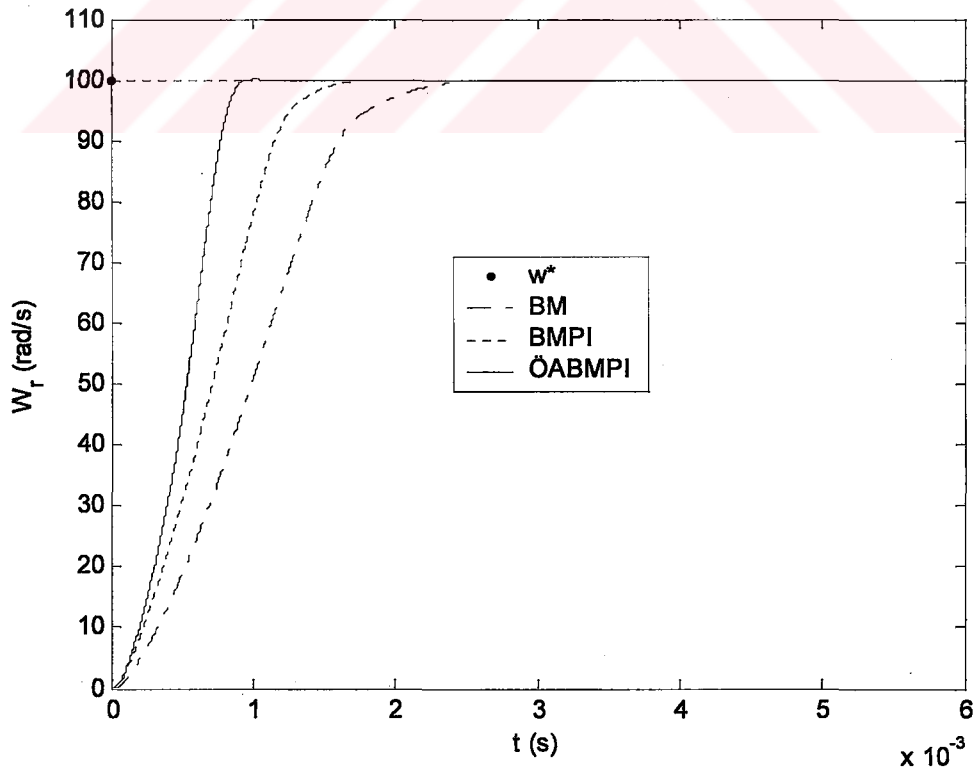
Denetleyici	$t_{ro}$ (s)	$t_{so}$ (s)	$O_s$ (%)	$e_{ss}$
PI	0.000984	0.0400	9.9892	0.0130
BM	0.002832	0.0036	0.0131	0.0028
BMPI	0.002005	0.0025	0.0051	0.0041
ÖABMPI	0.000990	0.0013	0.0487	0.0055

Tablo 5.2. DMSM yüksüz durumda denetleyici performanslarının karşılaştırılması.

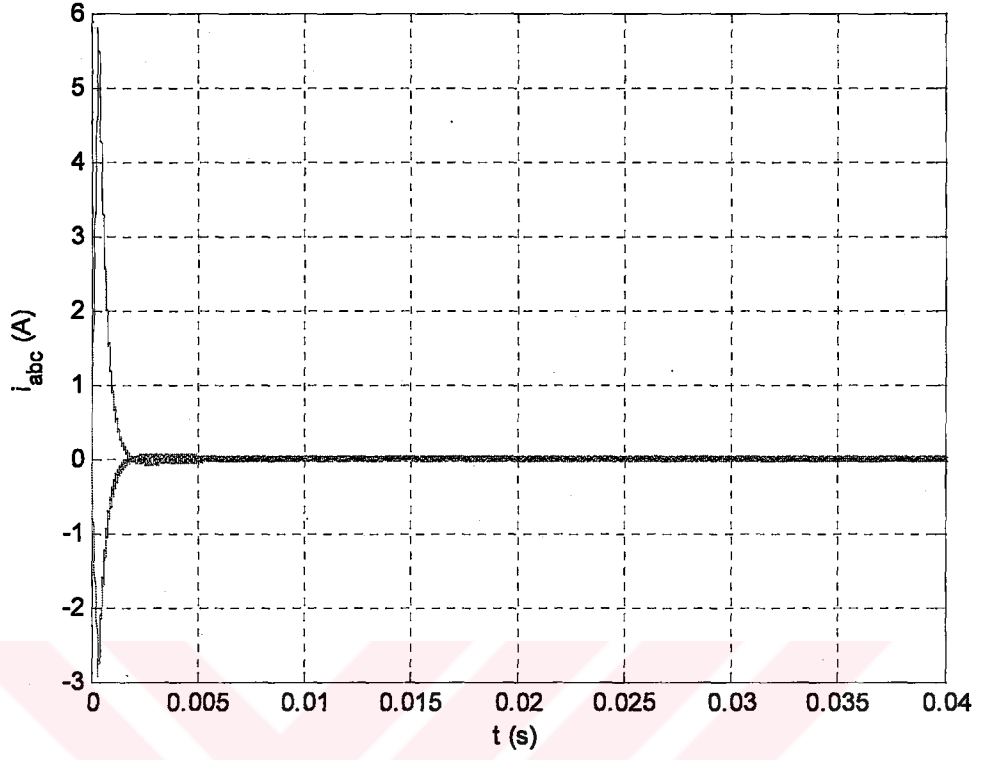
Denetleyiciler	$t_{ro}$ (%)	Denetleyiciler	$t_{so}$ (%)
PI-BM	48	ÖABMPI-PI	94
PI-BMPI	34	ÖABMPI-BM	46
PI-ÖABMPI	1	ÖABMPI-BMPI	32
ÖABMPI-BM	48	BMPI-PI	88
ÖABMPI-BMPI	34	BMPI-BM	18
BMPI-BM	18	BM-PI	84
Denetleyiciler	$O_s$ (%)	Denetleyiciler	$e_{ss}$ (%)
BMPI-PI	100	BM-PI	64
BMPI-BM	44	BM-BMPI	18
BMPI-ÖABMPI	82	BM-ÖABMPI	32
BM-PI	100	BMPI-PI	52
BM-ÖABMPI	58	BMPI-ÖABMPI	14
ÖABMPI-PI	100	ÖABMPI-PI	40



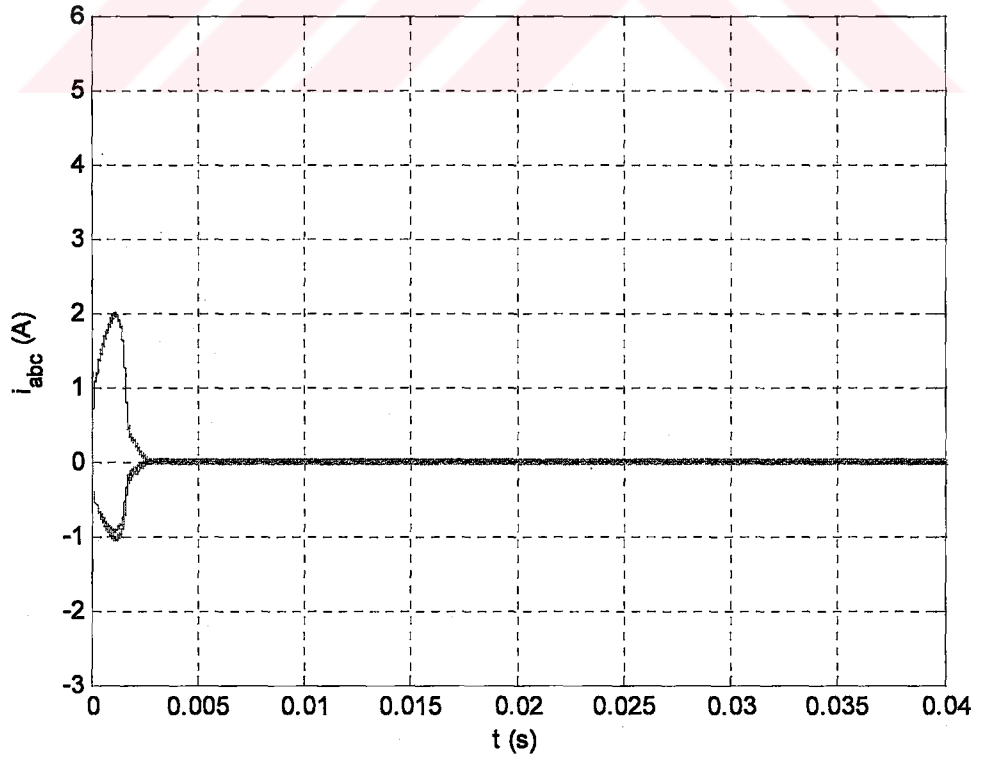
Şekil 5.1. DMSM'nin PI ve BM denetleyiciler ile yüksüz durumda hız cevapları.



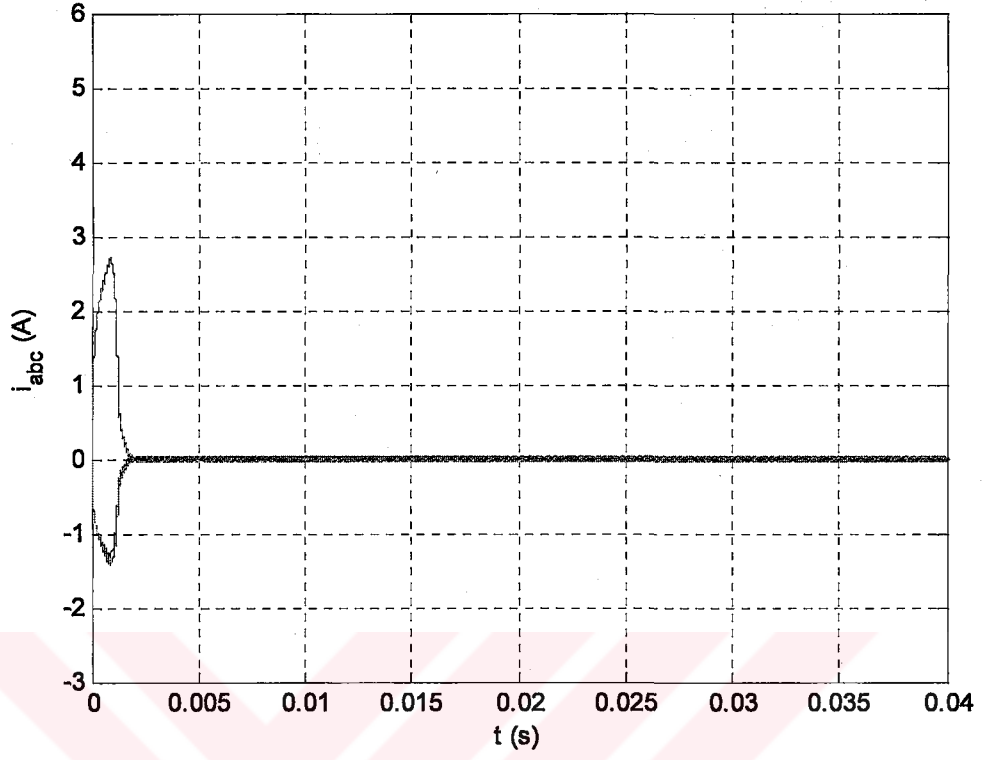
Şekil 5.2. DMSM'nin BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyiciler ile yüksüz durumda hız cevapları.



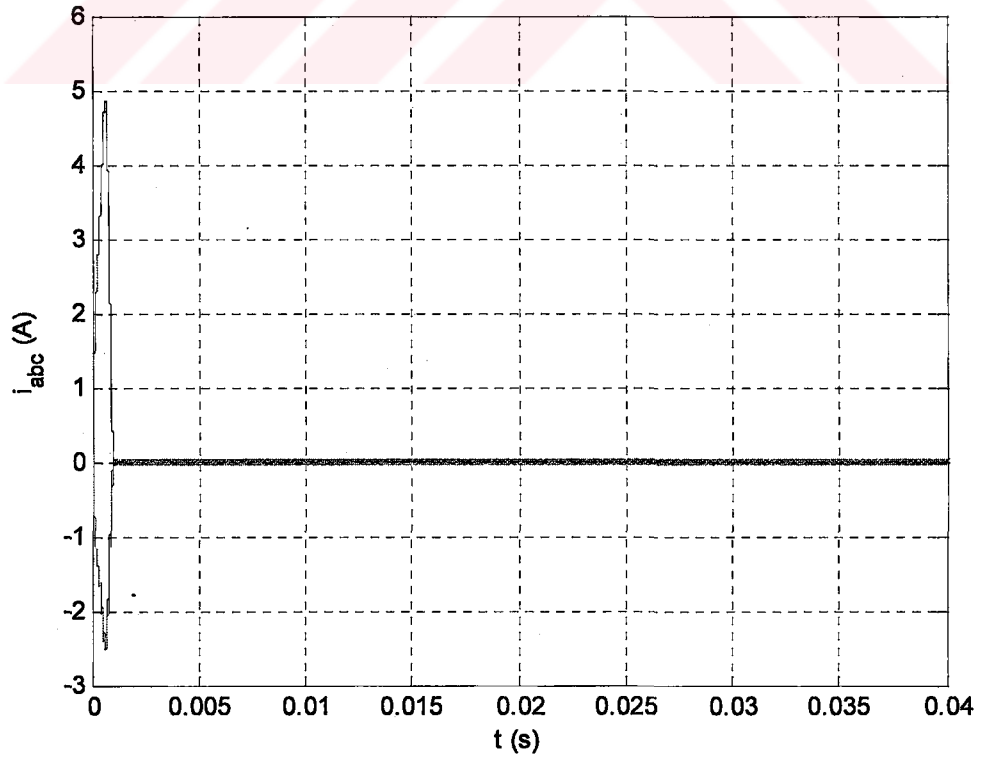
Şekil 5.3. DMSM'nin PI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen  $i_{abc}$  faz akım değerlerinin zamana göre değişimi.



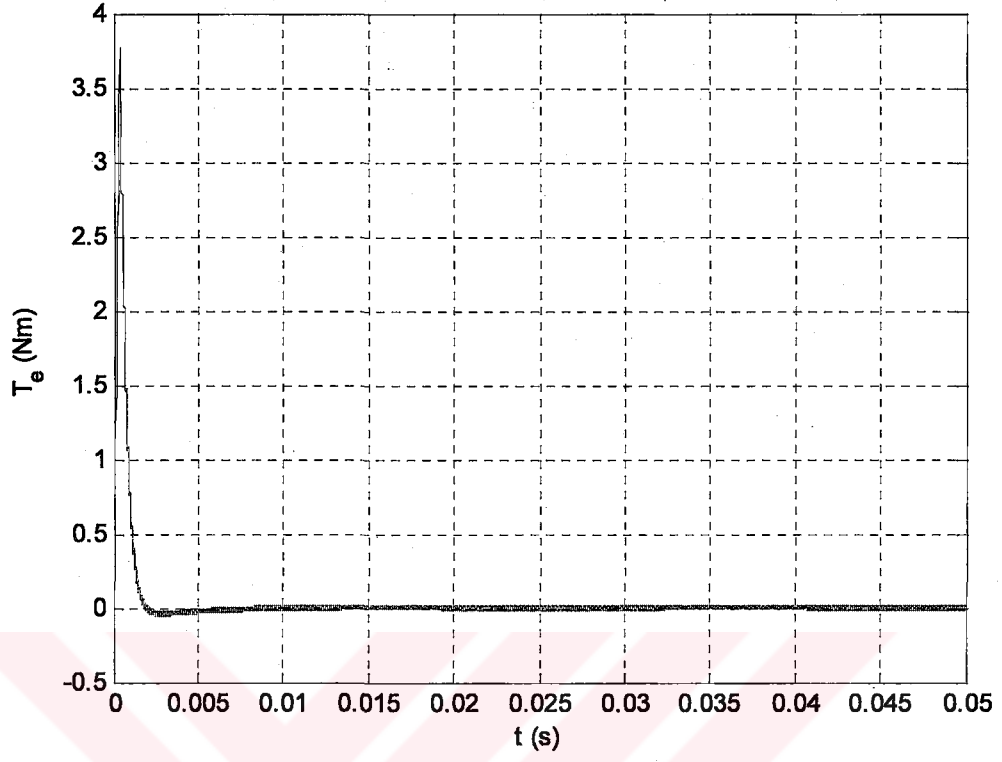
Şekil 5.4. DMSM'nin BM denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen  $i_{abc}$  akım değerlerinin zamana göre değişimleri.



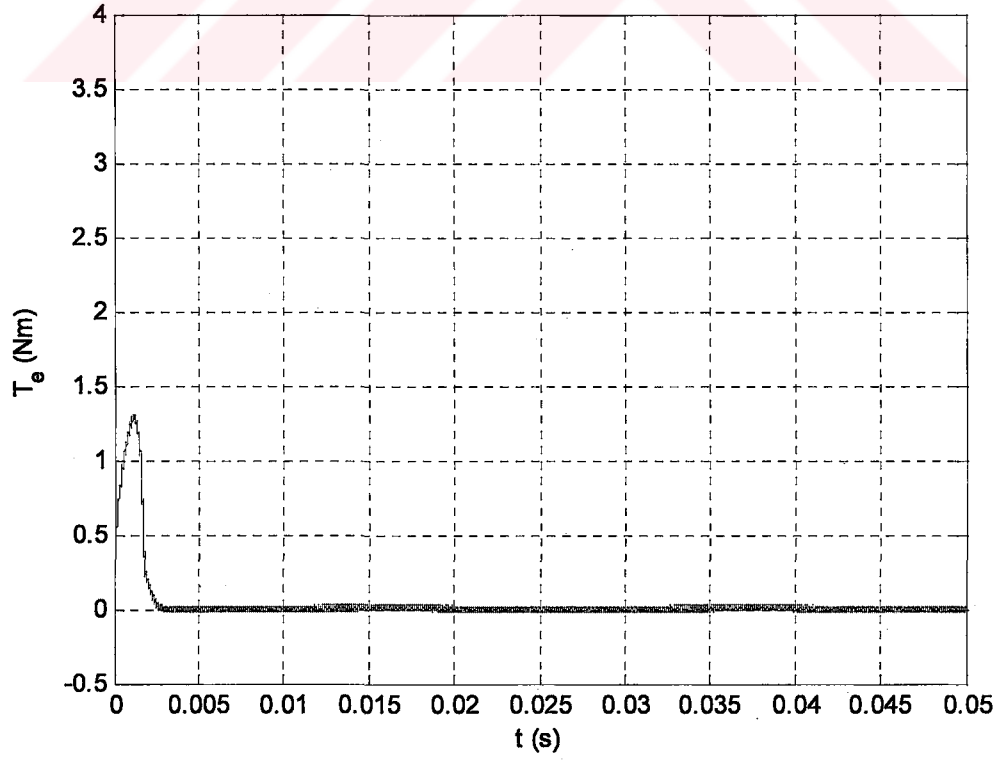
Şekil 5.5. DMSM'nin BMPI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen  $i_{abc}$  akım değerlerinin zamana göre değişimleri.



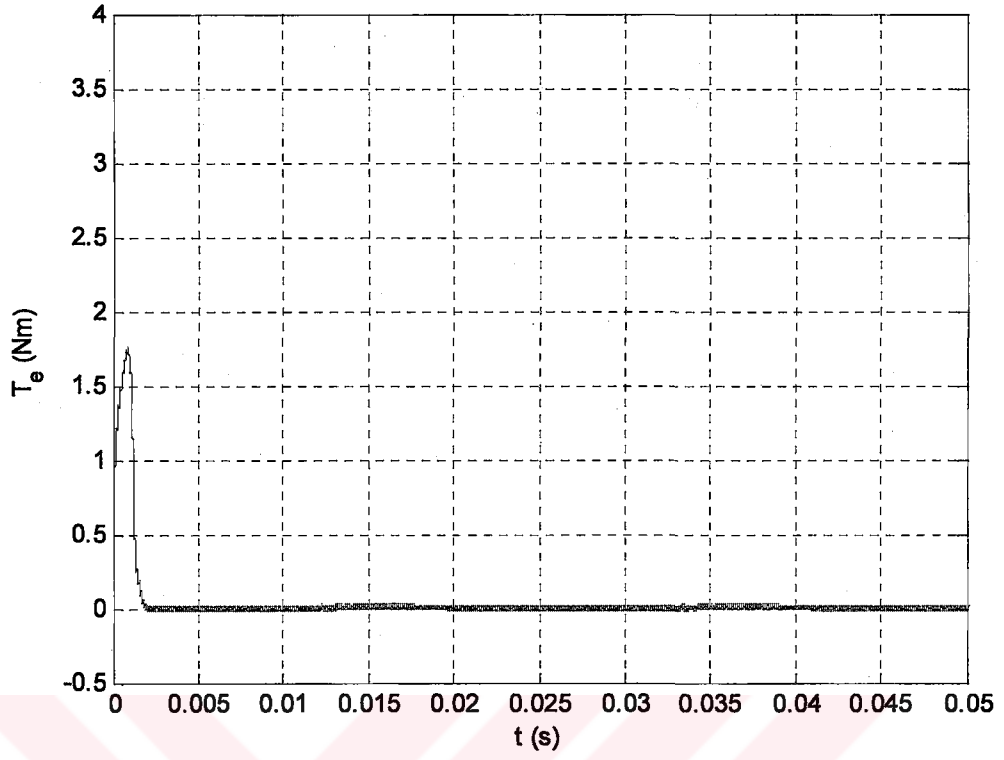
Şekil 5.6. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen  $i_{abc}$  akım değerlerinin zamana göre değişimleri.



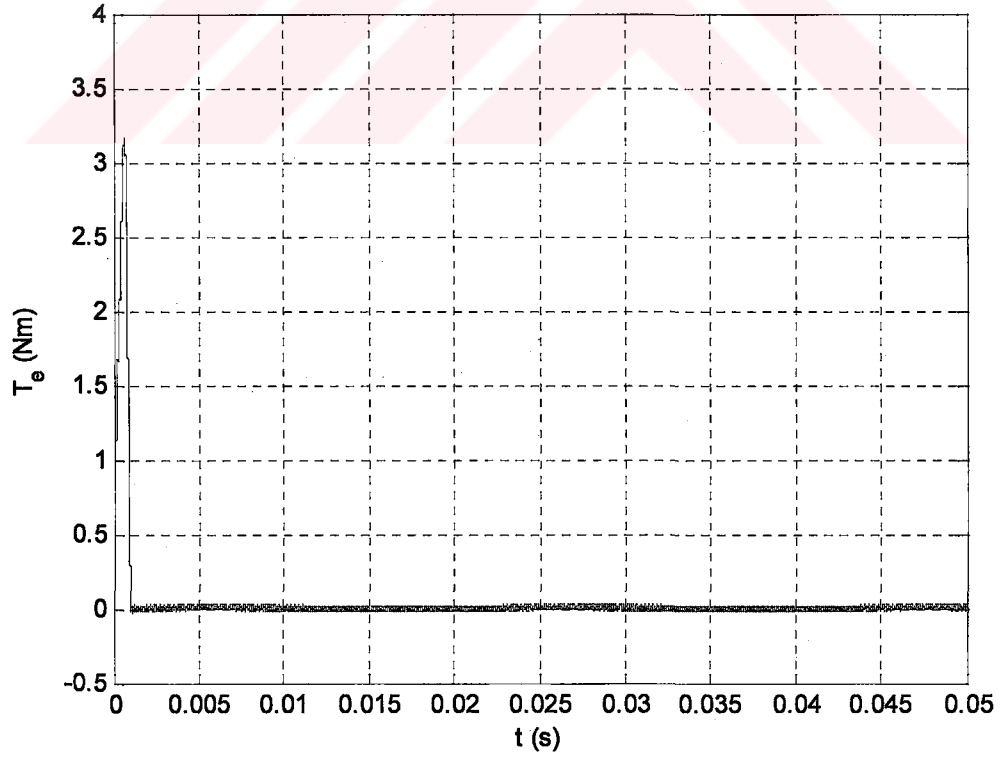
Şekil 5.7. DMSM'nin PI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen  $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.



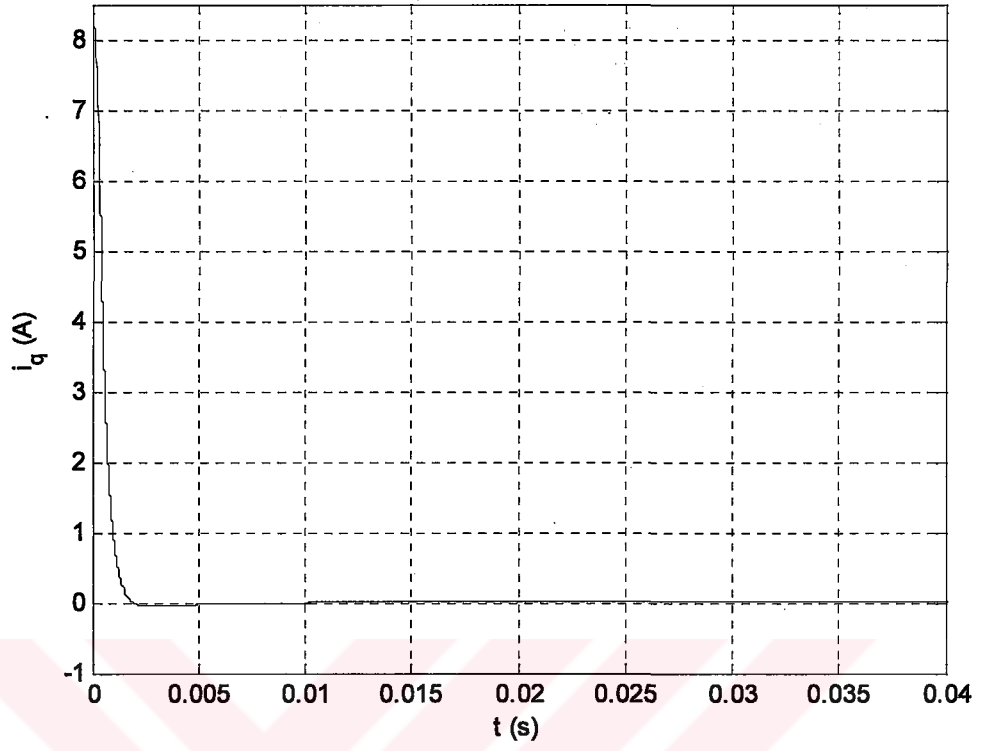
Şekil 5.8. DMSM'nin BM denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen  $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.



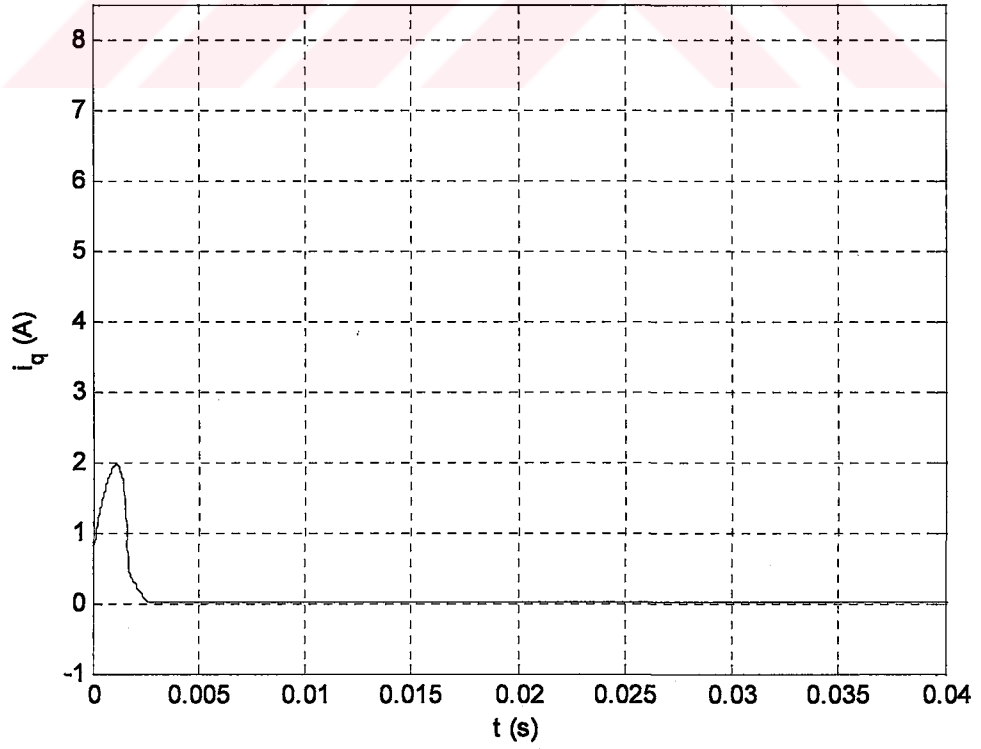
Şekil 5.9. DMSM'nin BMPI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen  $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.



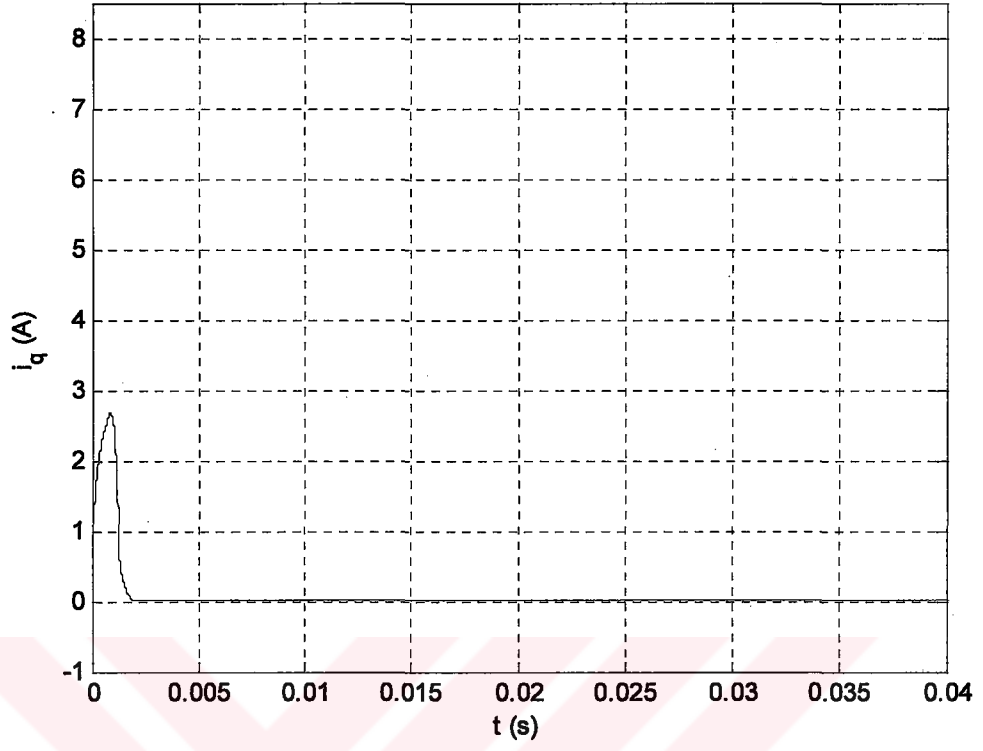
Şekil 5.10. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen  $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.



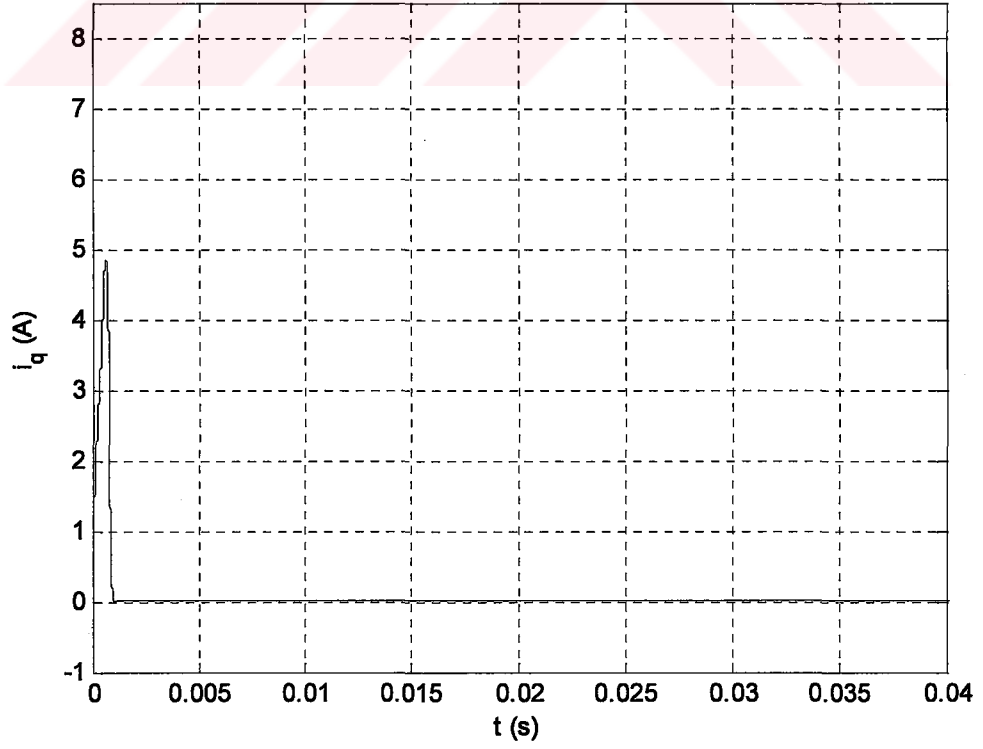
Şekil 5.11. DMSM'nin PI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.



Şekil 5.12. DMSM'nin BM denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.



Şekil 5.13. DMSM'nin BMPI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.



Şekil 5.14. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici ile yüksüz durumda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.

## 5.2. Yüklü Durumda

Motor mili yüklü durumda ( $T_L=0.83$  Nm) sistem çalıştırılmaktadır. Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da, referans hız 100 rad/s değerinde elde edilen grafikler görülmektedir. Tablo 5.3'de,  $t_{rL}$ ; açısal hızın yükselme zamanını,  $t_{sL}$ ; açısal hızın nominal değere ulaşma zamanını ifade etmektedir ve denetleyicilerden elde edilen sonuçlar görülmektedir.

Tablo 5.4'de; denetleyiciler kendi aralarında yüzdesel (%) olarak karşılaştırılmaktadır. Buna göre; yükselme zamanı ve açısal hızın nominal değerine ulaşma zamanı bakımından ÖABMPI denetleyici, aşma miktarı ve kalıcı durum hatası açısından ise BM denetleyici diğer denetleyicilere nazaran en iyi performansı göstermektedir.

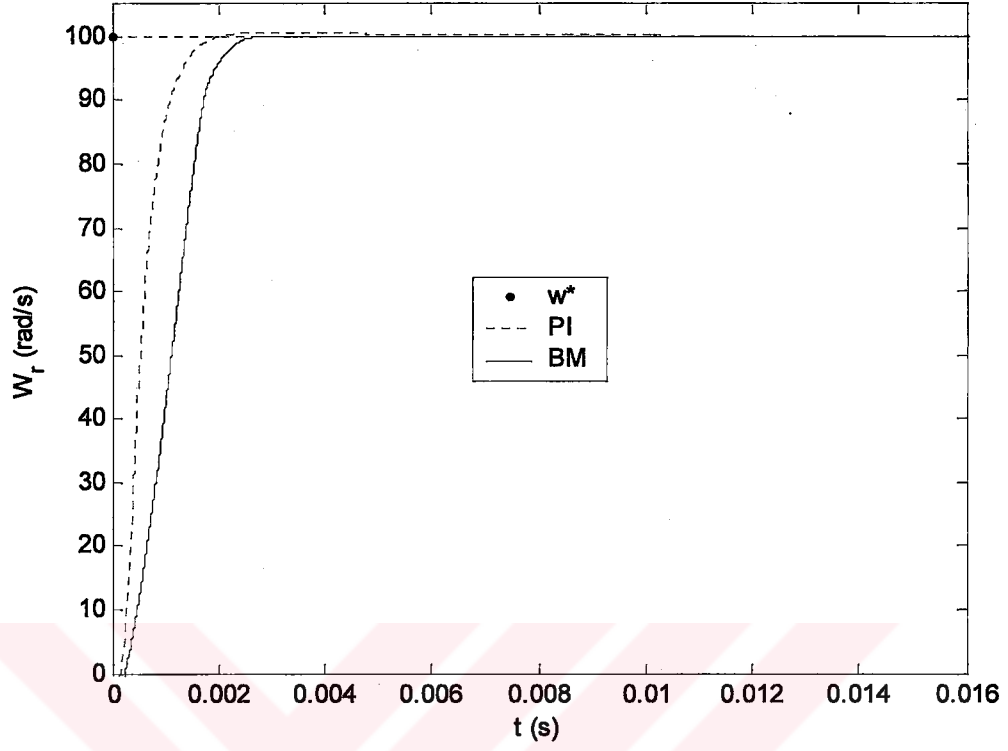
DMSM'nin  $T_L=0.83$  Nm ile çalışma durumunda: PI denetleyici (Şekil 5.17, Şekil 5.21, Şekil 5.25), BM denetleyici (Şekil 5.18, Şekil 5.22, Şekil 5.26), BMPI denetleyici (Şekil 5.19, Şekil 5.23, Şekil 5.27) ve ÖABMPI denetleyici (Şekil 5.20, Şekil 5.24, Şekil 5.28) ile hız denetimi yapıldığında, sırasıyla  $i_{abc}$  faz akımları,  $T_e$  moment ve  $i_q$  akım değişimleri görülmektedir.

Tablo 5.3. DMSM yüklü durumda denetleyicilerin hız performans analizi.

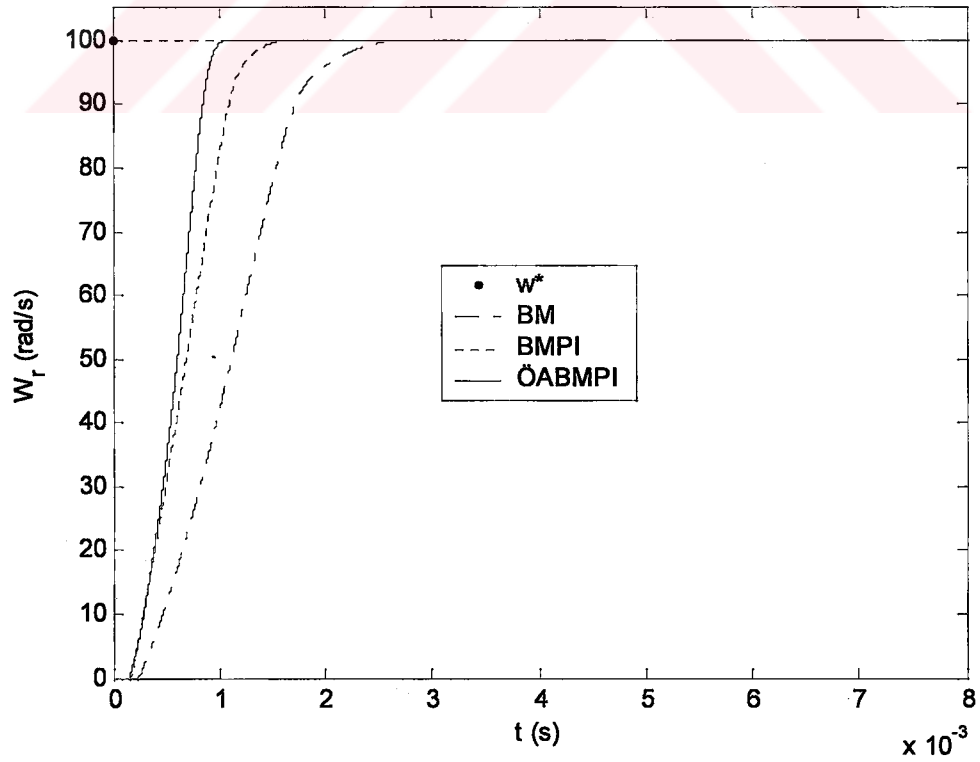
Denetleyici	$t_{rL}$ (s)	$t_{sL}$ (s)	$O_s$ (%)	$e_{ss}$
PI	0.0020312	0.0200	0.6089	0.0138
BM	0.0029070	0.0036	0.0178	0.0027
BMPI	0.0016500	0.0023	0.0374	0.0042
ÖABMPI	0.0010700	0.0014	0.0893	0.0054

Tablo 5.4. DMSM yüklü durumda denetleyici performanslarının karşılaştırılması.

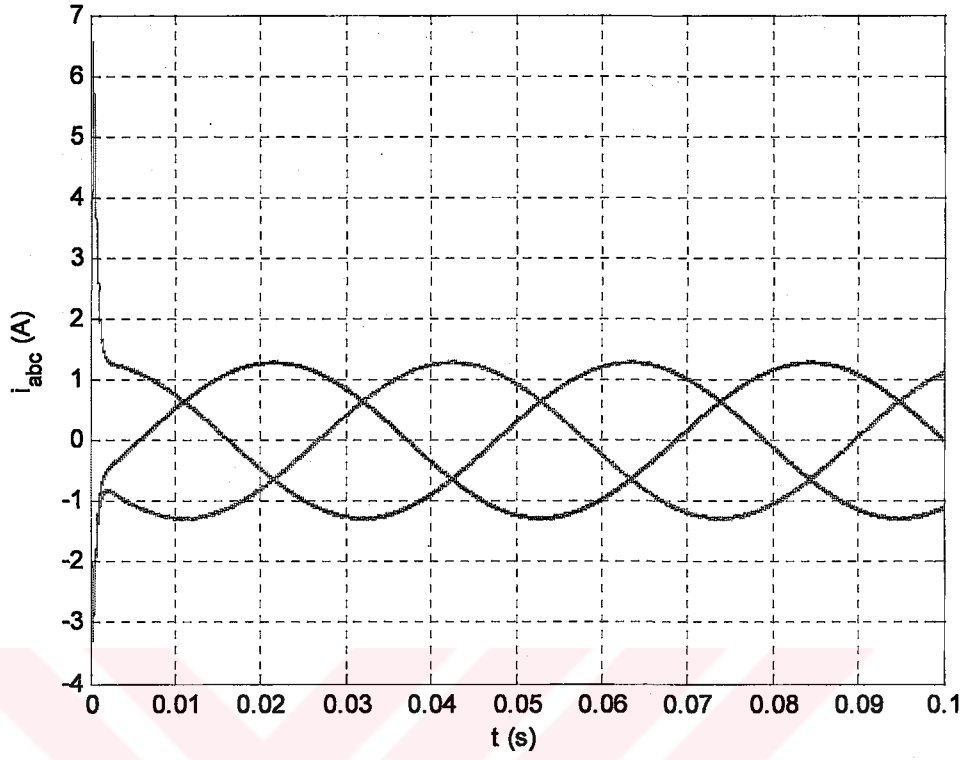
Denetleyiciler	$t_{rL}$ (%)	Denetleyiciler	$t_{sL}$ (%)
ÖABMPI-PI	30	ÖABMPI-PI	86
ÖABMPI-BM	46	ÖABMPI-BM	44
ÖABMPI-BMPI	22	ÖABMPI-BMPI	24
BMPI-PI	10	BMPI-PI	80
BMPI-BM	28	BMPI-BM	22
PI-BM	18	BM-PI	70
Denetleyiciler	$O_s$ (%)	Denetleyiciler	$e_{ss}$ (%)
BM-PI	94	BM-PI	68
BM-BMPI	36	BM-BMPI	22
BM-ÖABMPI	66	BM-ÖABMPI	34
BMPI-PI	88	BMPI-PI	54
BMPI-ÖABMPI	40	BMPI-ÖABMPI	12
ÖABMPI-PI	74	ÖABMPI-PI	44



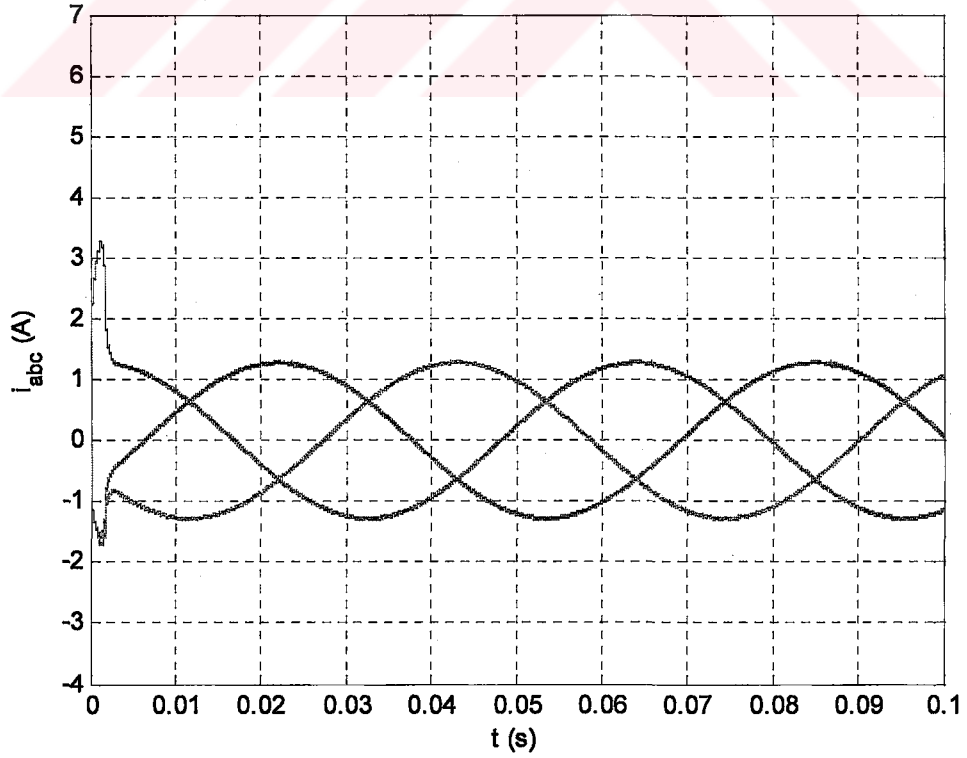
Şekil 5.15. DMSM'nin PI ve BM denetleyiciler ile yüklü durumda hız cevapları.



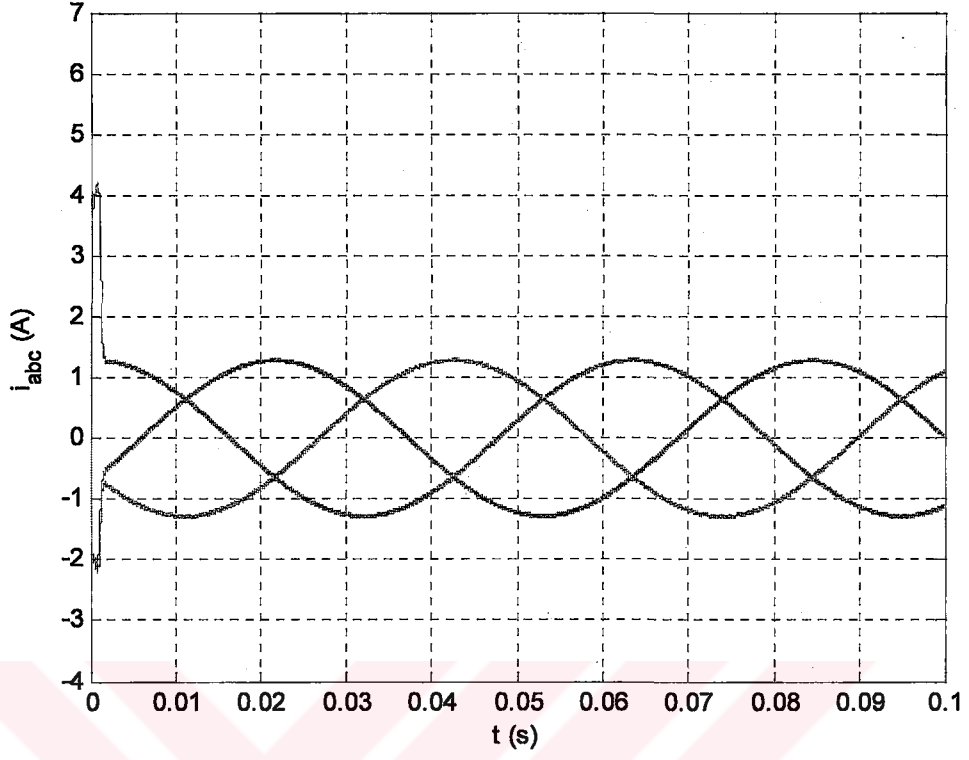
Şekil 5.16. DMSM'nin BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyiciler ile yüklü durumda hız cevapları.



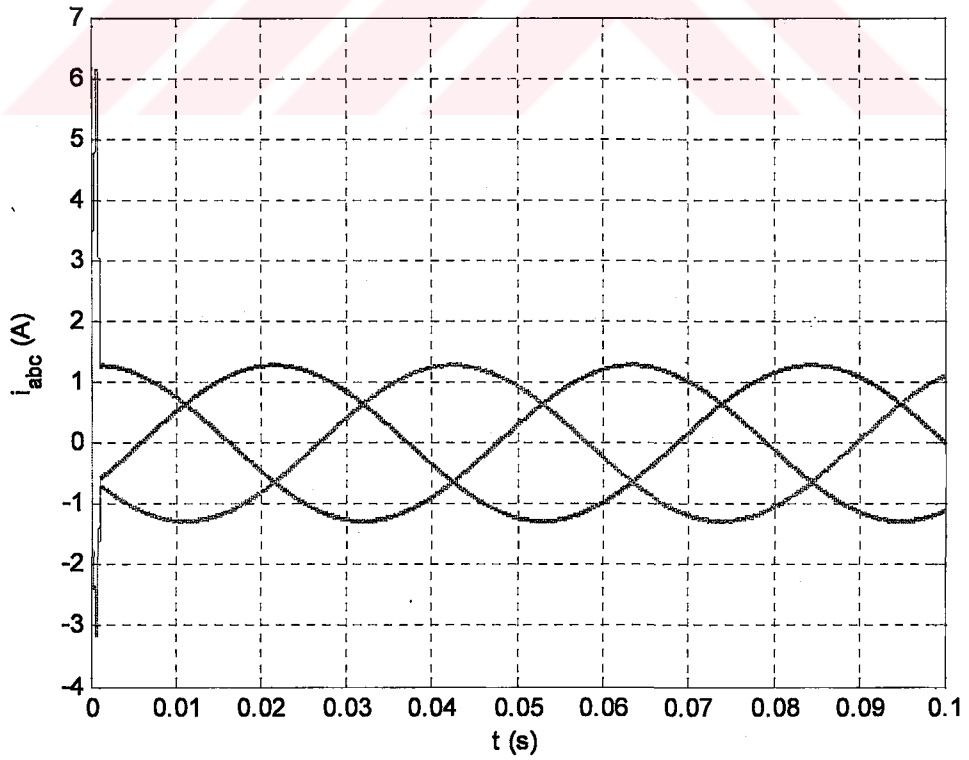
Şekil 5.17. DMSM'nin PI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen  $i_{abc}$  akım değerlerinin zamana göre değişimleri.



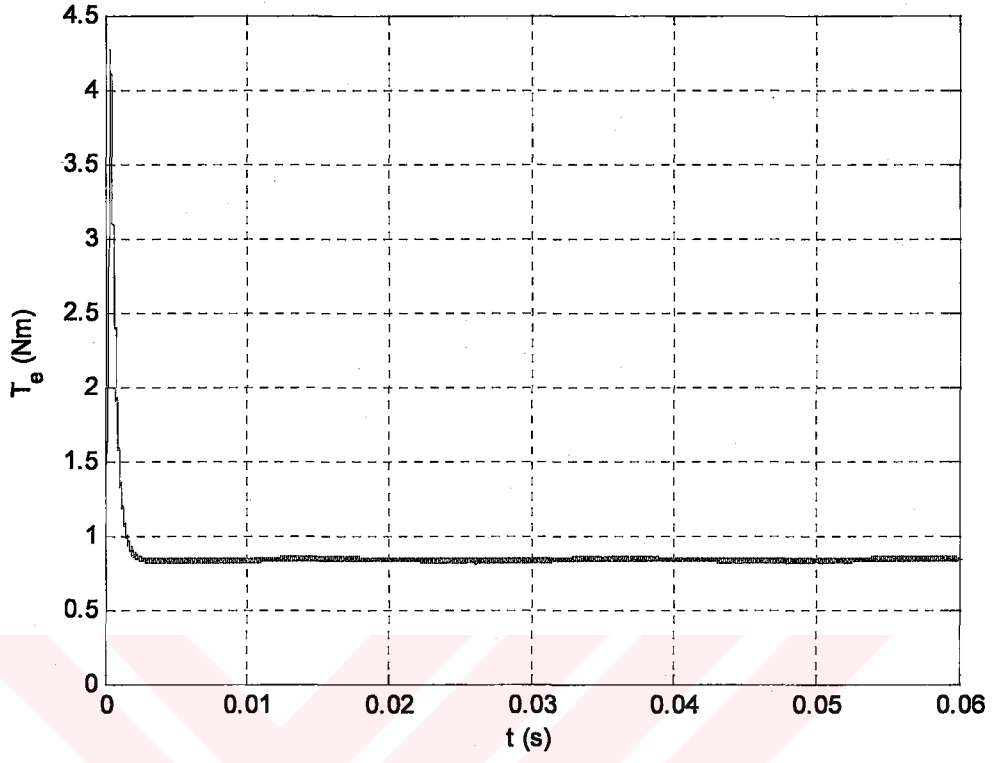
Şekil 5.18. DMSM'nin BM denetleyici ile yüklü durumda elde edilen  $i_{abc}$  akım değerlerinin zamana göre değişimleri.



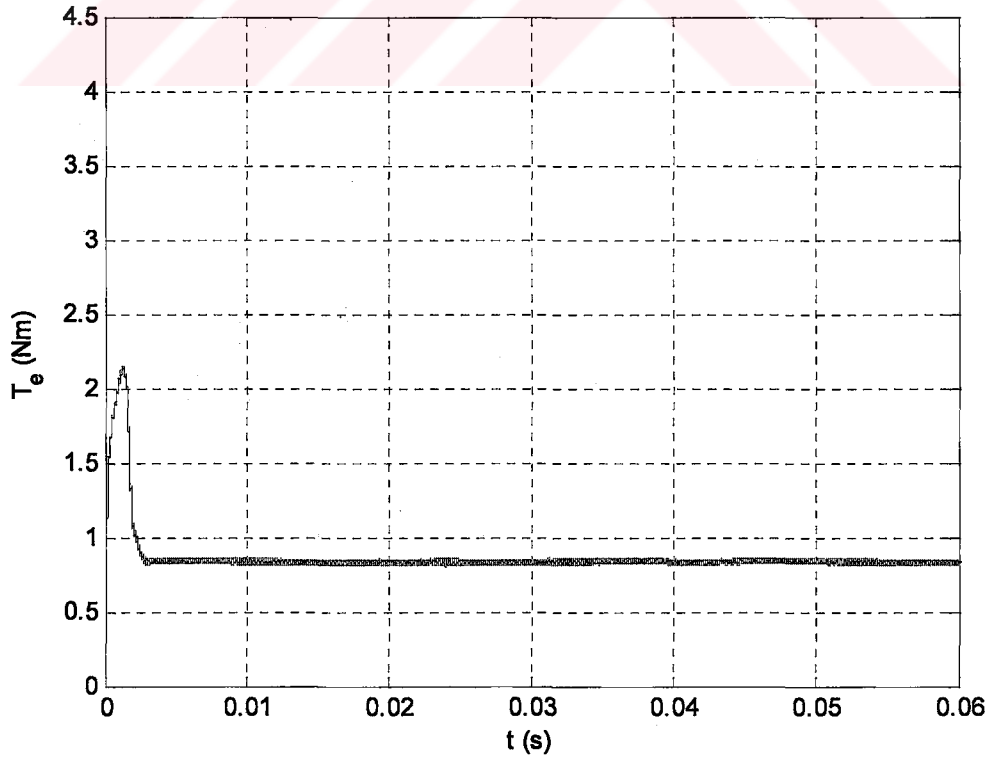
Şekil 5.19. DMSM'nin BMPI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen  $i_{abc}$  akım değerlerinin zamana göre değişimleri.



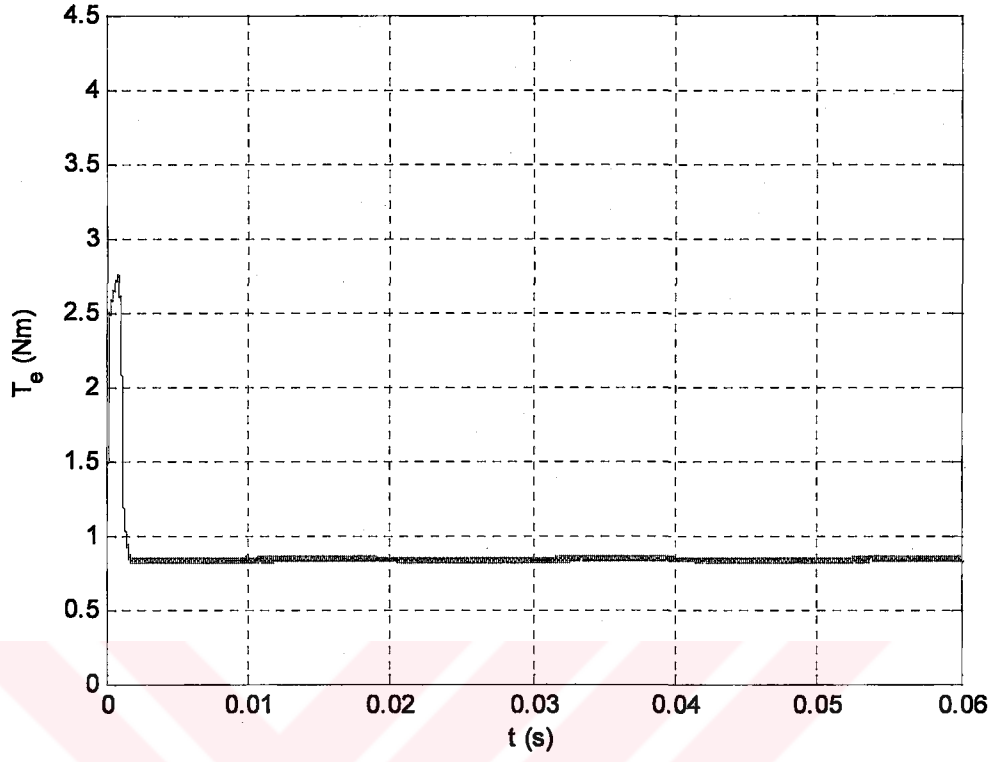
Şekil 5.20. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen  $i_{abc}$  akım değerlerinin zamana göre değişimleri.



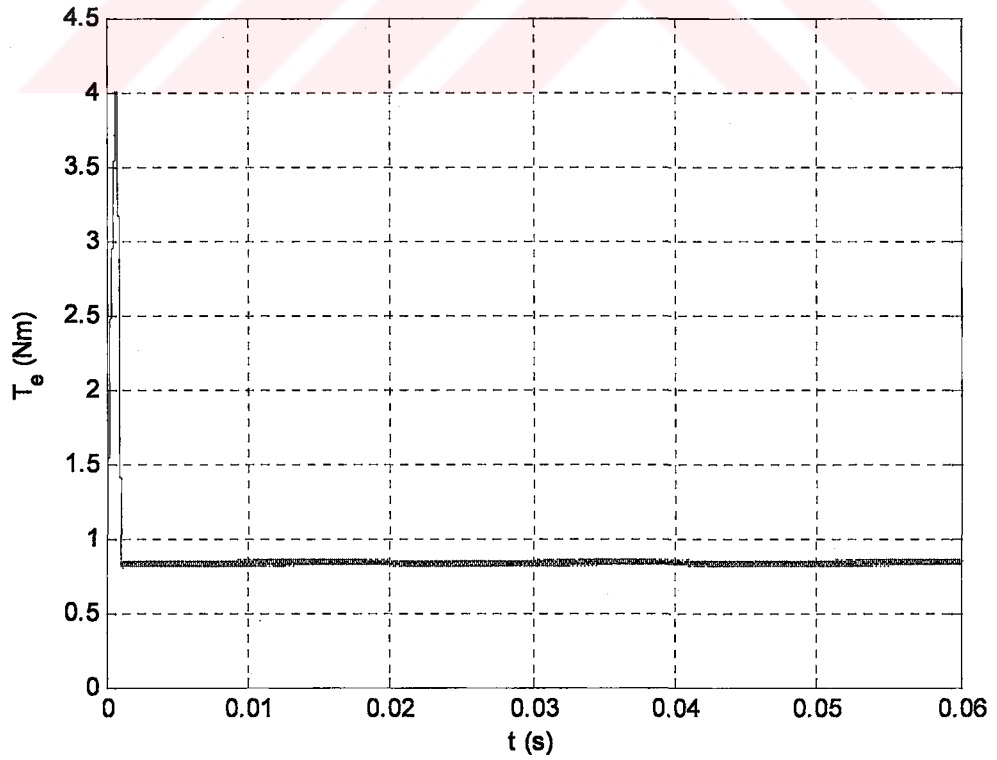
Şekil 5.21. DMSM'nin PI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen  $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.



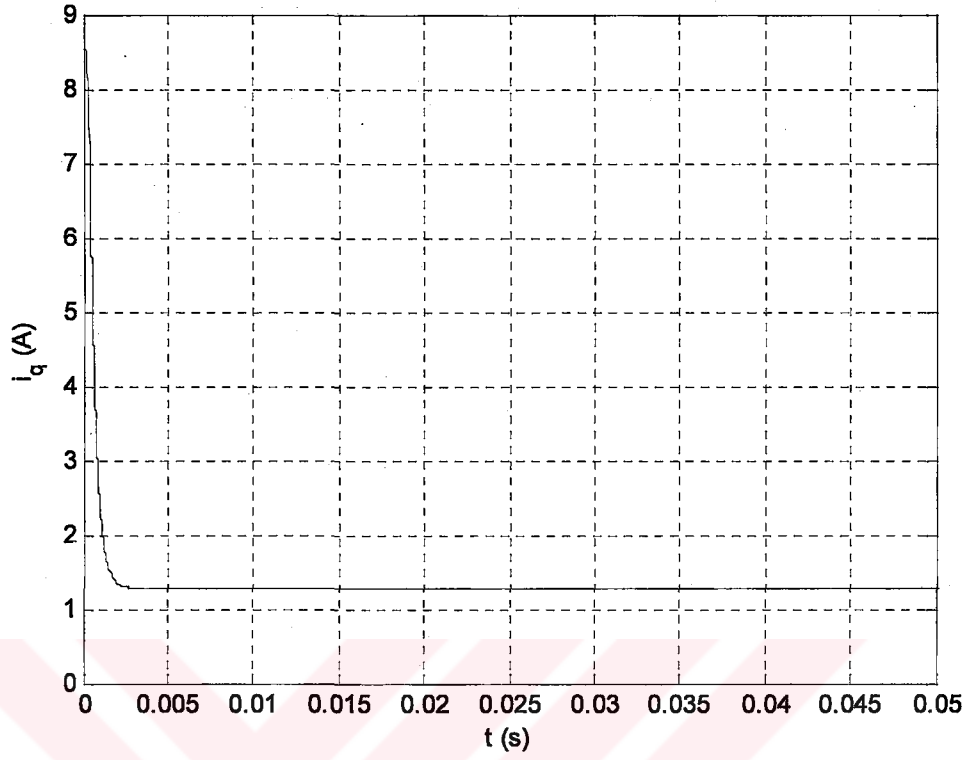
Şekil 5.22. DMSM'nin BM denetleyici ile yüklü durumda elde edilen  $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.



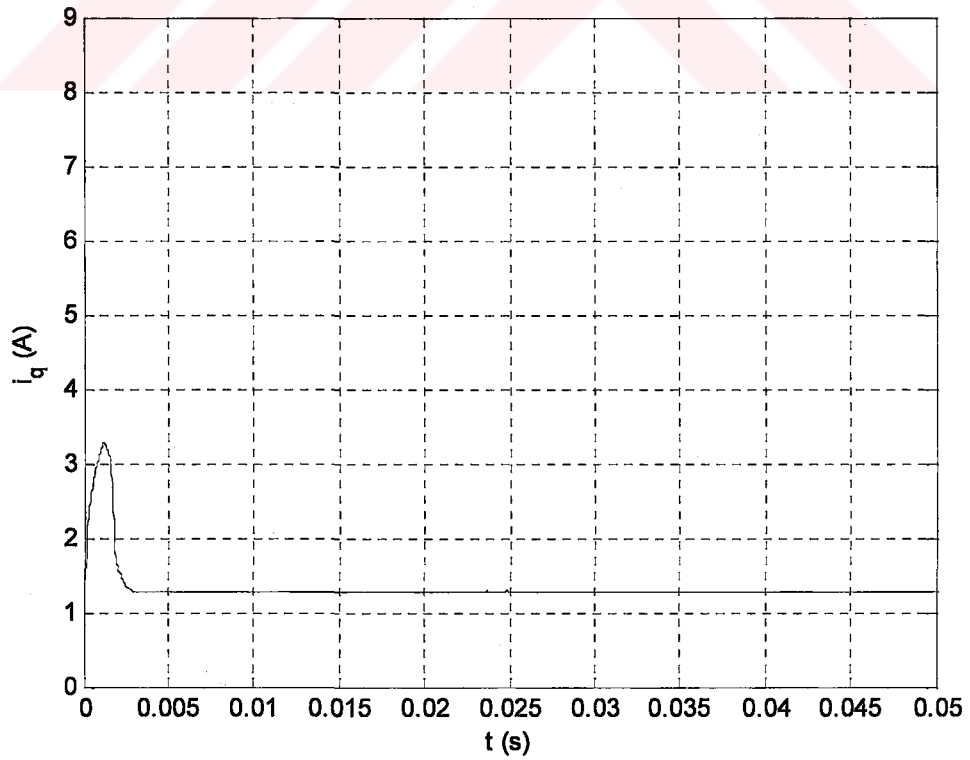
Şekil 5.23. DMSM'nin BMPI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen  $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.



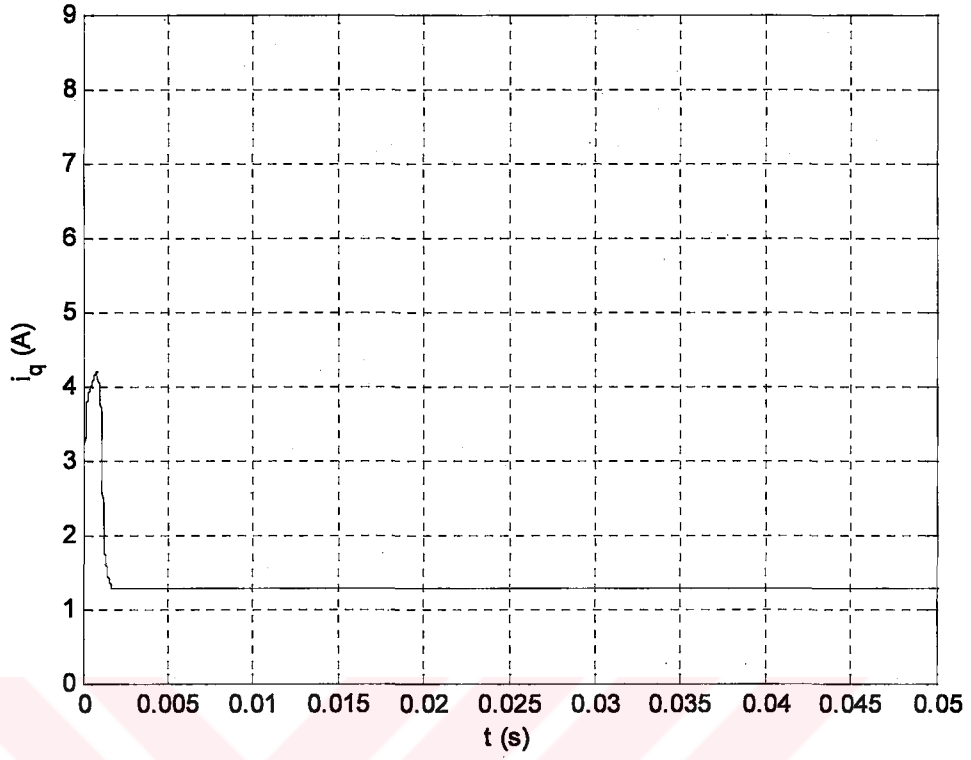
Şekil 5.24. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen  $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.



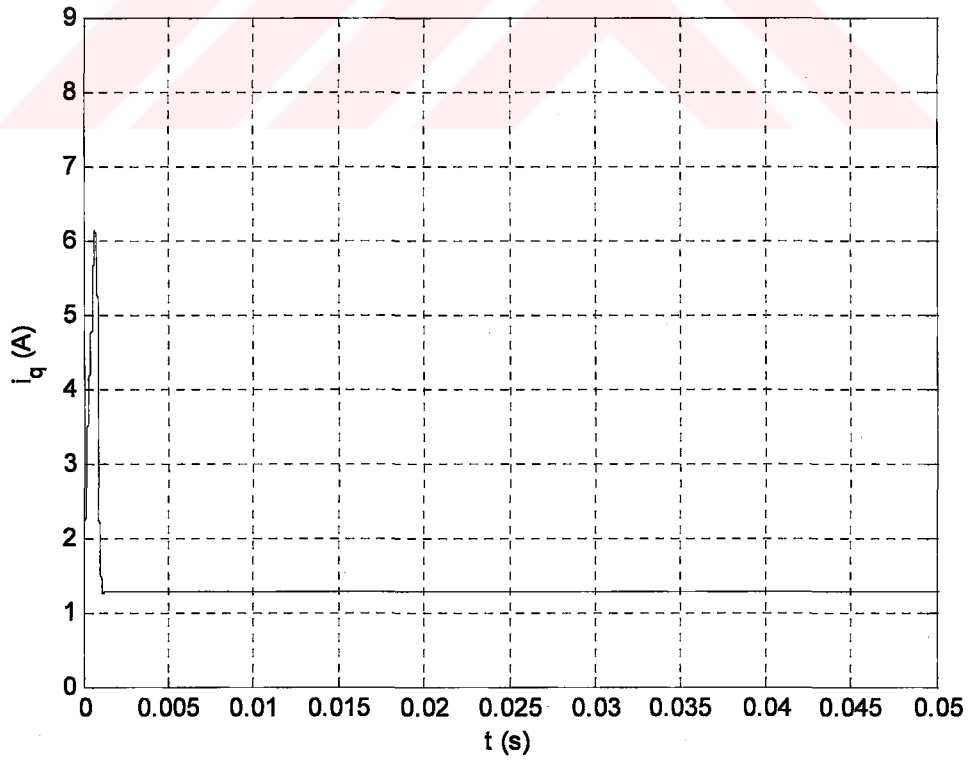
Şekil 5.25. DMSM'nin PI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.



Şekil 5.26. DMSM'nin BM denetleyici ile yüklü durumda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.



Şekil 5.27. DMSM'nin BMPI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.



Şekil 5.28. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici ile yüklü durumda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.

### 5.3. Ani Yüklü Durumda

Motor yüksüz durumda kalkış yaptıktan sonra, 0.04 s'de motorun nominal yükü olan  $T_L=0.83$  Nm ve aynı zamanda nominal yükten 0.2 Nm aşağı ( $T_L=0.63$  Nm) ve yukarı ( $T_L=1.03$  Nm) yük ile ani yüklenerek sistem çalıştırılmaktadır. Şekil 5.29, Şekil 5.30, Şekil 5.31, Şekil 5.32, Şekil 5.33 ve Şekil 5.34'de, referans hız 100 rad/s değerinde elde edilen grafikler görülmektedir. Tablo 5.5'de,  $\Delta t_i$ ; hızın referans değerine ulaşma zamanını,  $\Delta \omega_i$ ; açısal hız değişimini,  $O_{si}$ ; aşma miktarını,  $e_{ssi}$ ; kalıcı durum hatasını ifade etmektedir.

Motorun nominal yükü ile yüklenmesi sonucu elde edilen değerler referans alınarak, denetleyiciler kendi aralarında yüzdesel (%) olarak Tablo 5.8'de karşılaştırılmaktadır. Buna göre; açısal hızın nominal değerine ulaşma zamanı ve açısal hız değişimi bakımından ÖABMPI, aşma miktarı bakımından BMPI ve kalıcı durum hatası açısından ise BM diğer denetleyicilere nazaran en iyi performansı gösterdiği görülmektedir.

Motor  $T_L=0.63$  Nm,  $T_L=0.83$  Nm ve  $T_L=1.03$  Nm ile yüklenmesi sonucu elde edilen değerler sırası ile Tablo 5.5, Tablo 5.6 ve Tablo 5.7'de görülmektedir. Elde edilen değerlere bakıldığında, açısal hızın nominal değerine ulaşma zamanı ve açısal hız değişimi bakımından ÖABMPI, aşma miktarı bakımından  $T_L=0.63$  Nm'de PI ve  $T_L=1.03$  Nm'de ise PI ile BMPI ve kalıcı durum hatası açısından BM diğer denetleyicilere nazaran en iyi performansı gösterdiği görülmektedir.

DMSM'nin  $T_L=0.83$  Nm ile ani yüklenerek çalışması durumunda: PI denetleyici (Şekil 5.35, Şekil 5.39, Şekil 5.43), BM denetleyici (Şekil 5.36, Şekil 5.40, Şekil 5.44), BMPI denetleyici (Şekil 5.37, Şekil 5.41, Şekil 5.45) ve ÖABMPI denetleyici (Şekil 5.38, Şekil 5.42, Şekil 5.46) ile hız denetimi yapıldığında, sırasıyla  $i_{abc}$  faz akımları,  $T_e$  moment ve  $i_q$  akım değişimleri görülmektedir.

Tablo 5.5. DMSM'nin, TL=0.63 Nm ile ani yüklü durumda denetleyicilerin hız performans analizi.

Denetleyici	$\Delta t_i$ (s)	$\Delta \omega_i$ (rad/s)	$O_{si}$ (%)	$e_{ssi}$
PI	0.0315	9.9536	0	0.0135
BM	0.0060	2.6833	0.0156	0.0030
BMPI	0.0020	1.7533	0.0067	0.0040
ÖABMPI	0.0008	1.3698	0.0086	0.0055

Tablo 5.6. DMSM'nin, TL=0.83 Nm ile ani yüklü durumda denetleyicilerin hız performans analizi.

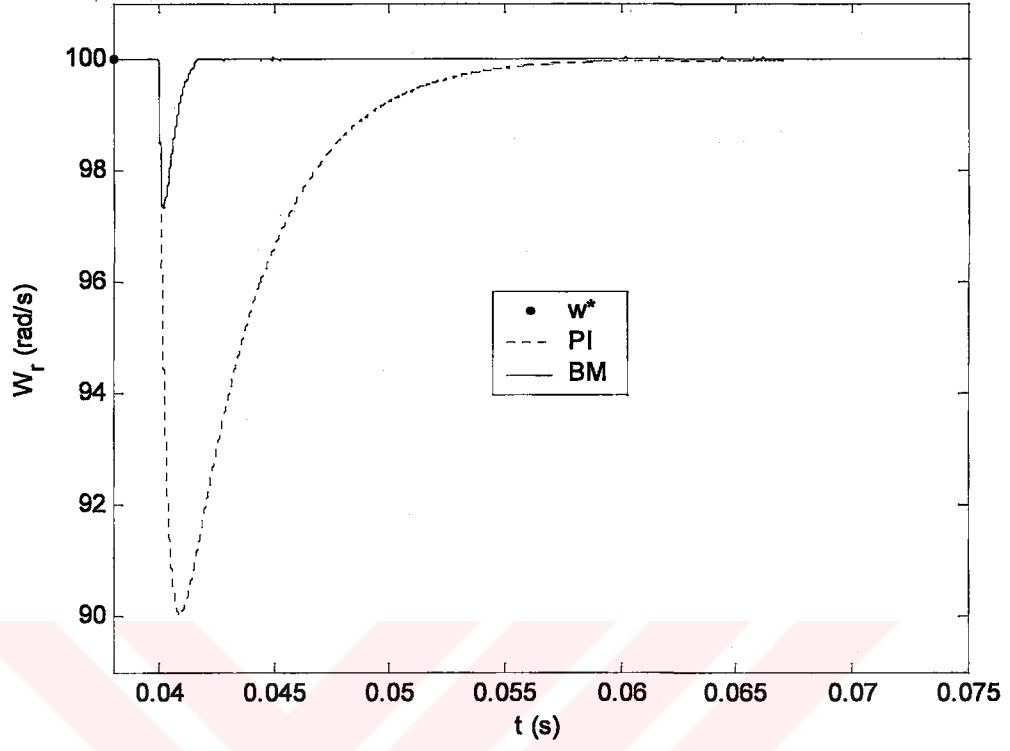
Denetleyici	$\Delta t_i$ (s)	$\Delta \omega_i$ (rad/s)	$O_{si}$ (%)	$e_{ssi}$
PI	0.0320	13.0994	0.0134	0.0137
BM	0.0060	3.65570	0.0290	0.0028
BMPI	0.0015	2.37100	0.0098	0.0042
ÖABMPI	0.0006	2.11230	0.0122	0.0053

Tablo 5.7. DMSM'nin TL=1.03 Nm ile ani yüklenmesi durumunda denetleyicilerin hız performans analizi.

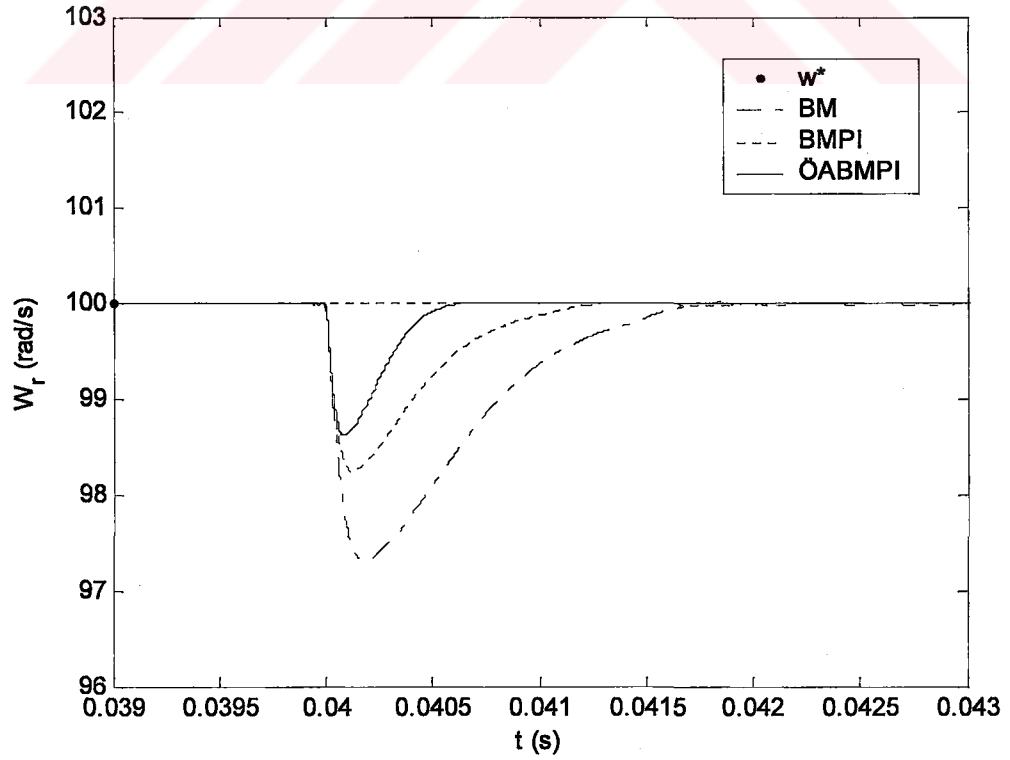
Denetleyici	$\Delta t_i$ (s)	$\Delta \omega_i$ (rad/s)	$O_{si}$ (%)	$e_{ssi}$
PI	0.0320	16.2245	0	0.0140
BM	0.0070	4.9466	0.0214	0.0039
BMPI	0.0020	3.4840	0	0.0041
ÖABMPI	0.0008	3.0557	0.1423	0.0055

Tablo 5.8. DMSM'nin, TL=0.83 Nm ile ani yüklü durumda denetleyicilerin performanslarının karşılaştırılması.

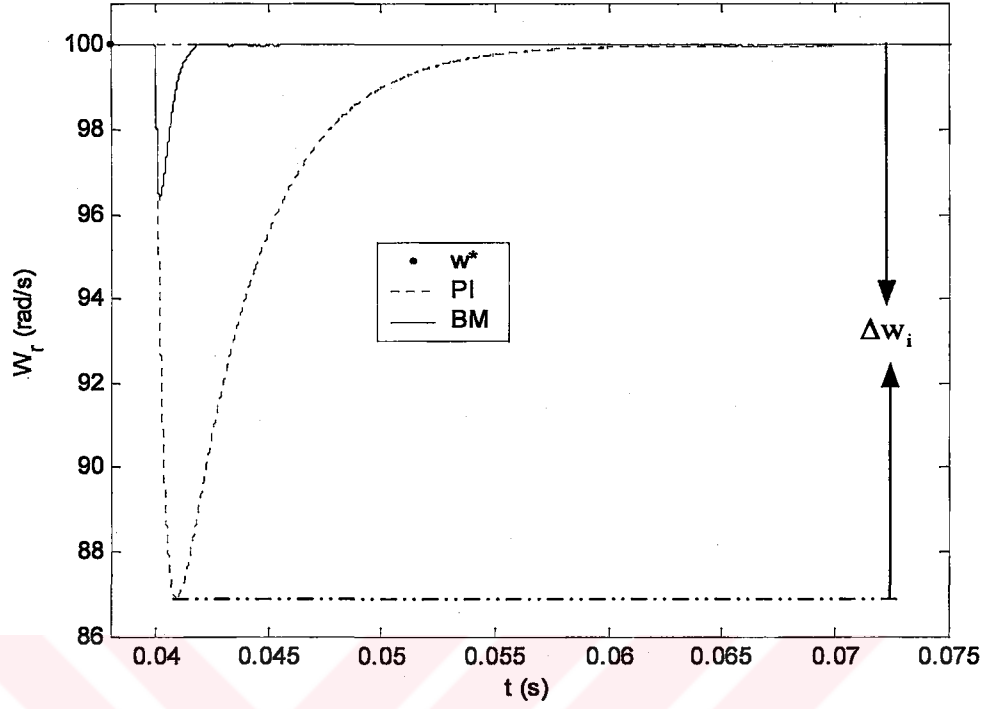
Denetleyiciler	$\Delta t_i$ (%)	Denetleyiciler	$\Delta w_i$ (%)
ÖABMPI-PI	96	ÖABMPI-PI	72
ÖABMPI-BM	82	ÖABMPI-BM	26
ÖABMPI-BMPI	42	ÖABMPI-BMPI	6
BMPI-PI	92	BMPI-PI	70
BMPI-BM	60	BMPI-BM	22
BM-PI	68	BM-PI	56
Denetleyiciler	$O_{si}$ (%)	Denetleyiciler	$e_{ssi}$ (%)
BMPI-PI	16	BM-PI	66
BMPI-BM	50	BM-BMPI	20
BMPI-ÖABMPI	10	BM-ÖABMPI	30
ÖABMPI-PI	4	BMPI-PI	54
ÖABMPI-BM	40	BMPI-ÖABMPI	12
BM-PI	36	ÖABMPI-PI	44



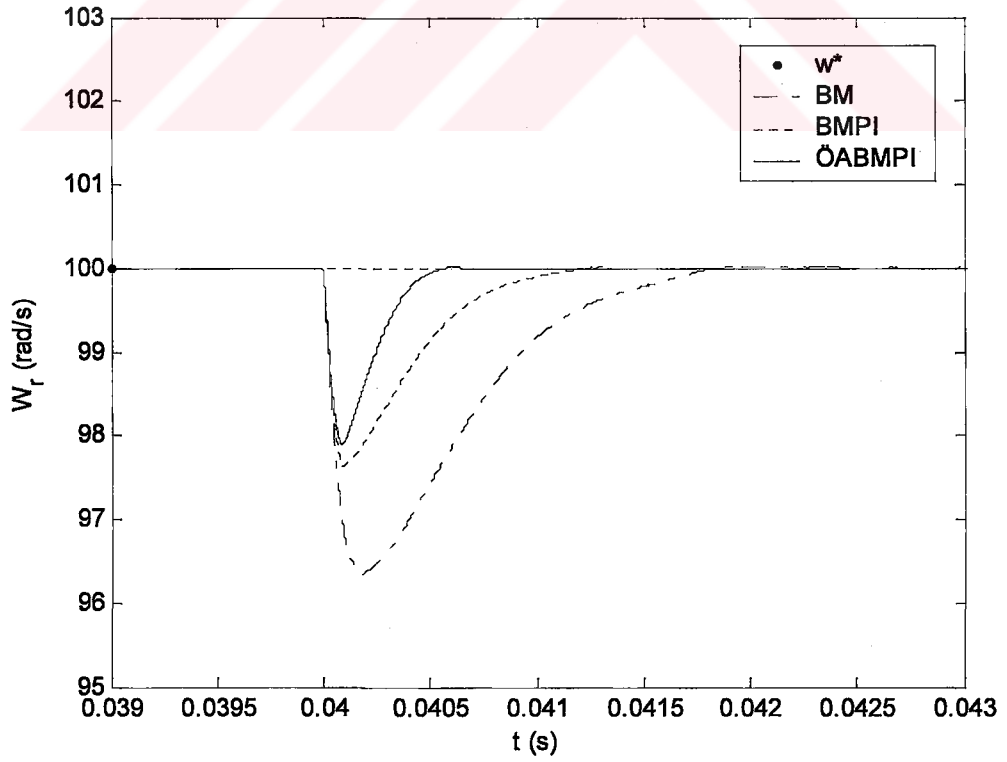
Şekil 5.29. DMSM'nin,  $T_L=0.63$  Nm ile ani yüklenmesi sonucu PI ve BM denetleyicilerin hız cevapları.



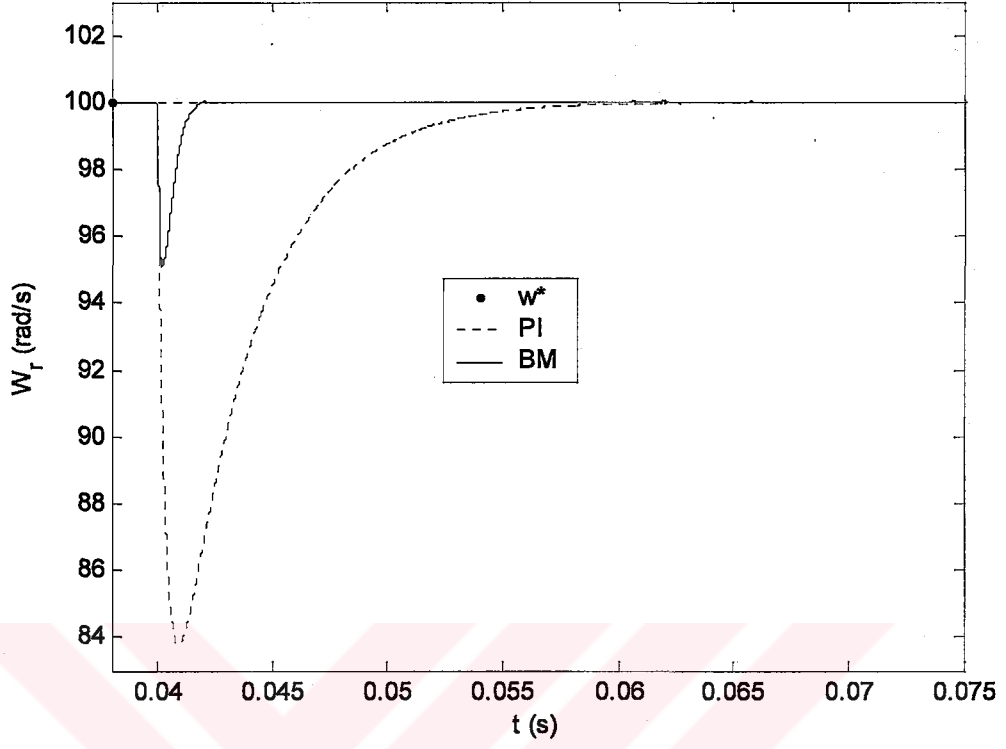
Şekil 5.30. DMSM'nin,  $T_L=0.63$  Nm ile ani yüklenmesi sonucu BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyicilerin hız cevapları.



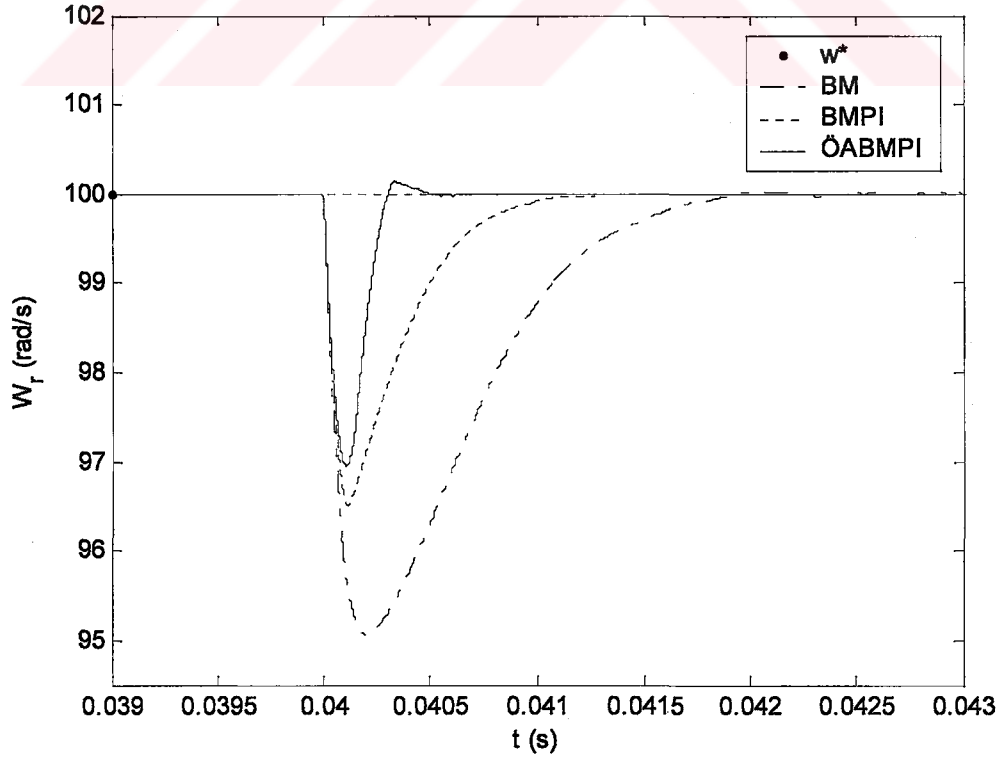
Şekil 5.31. DMSM'nin,  $T_L=0.83$  Nm ile ani yüklenmesi sonucu PI ve BM denetleyicilerin hız cevapları.



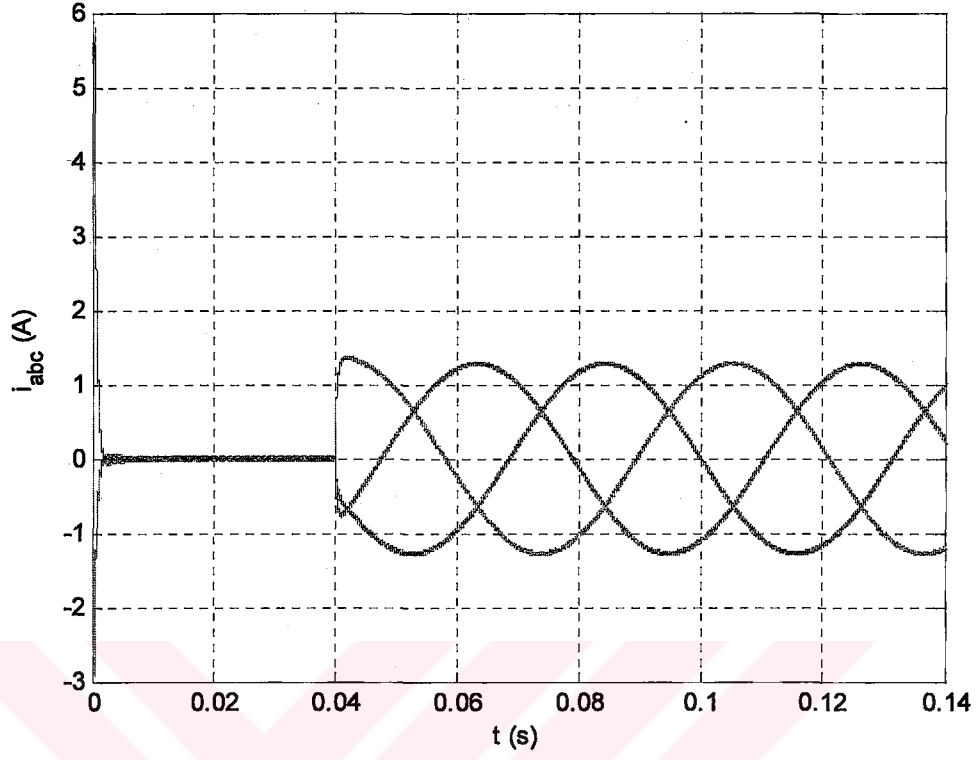
Şekil 5.32. DMSM'nin,  $T_L=0.83$  Nm ile ani yüklenmesi sonucu BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyicilerin hız cevapları.



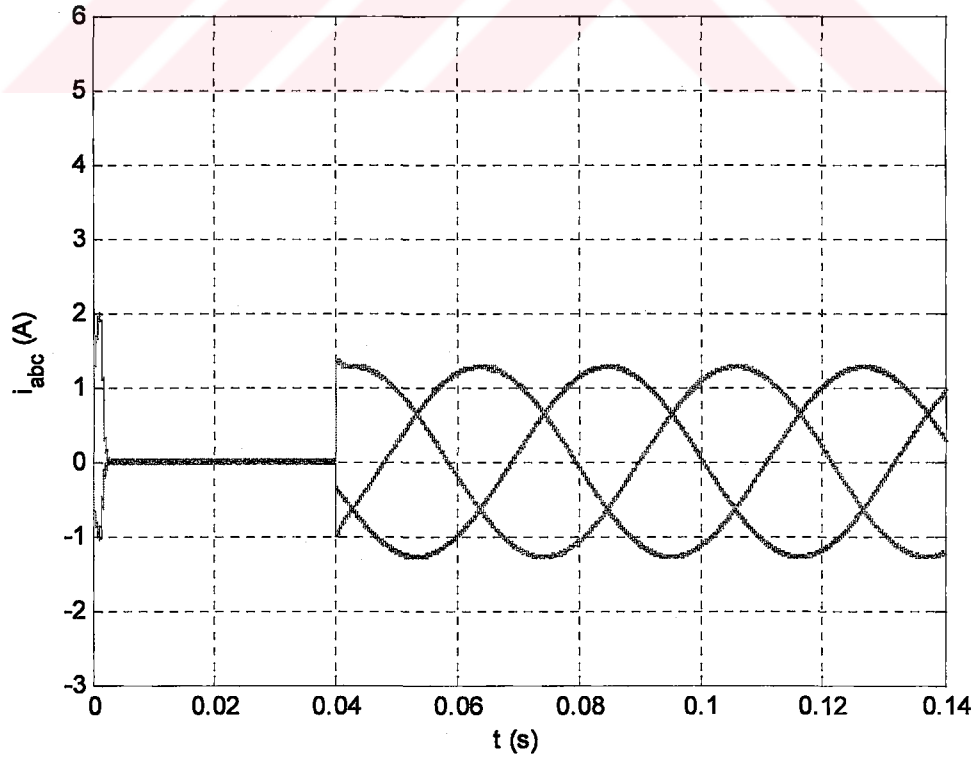
Şekil 5.33. DMSM'nin,  $T_L=1.03$  Nm ile ani yüklenmesi sonucu PI ve BM denetleyicilerin hız cevapları.



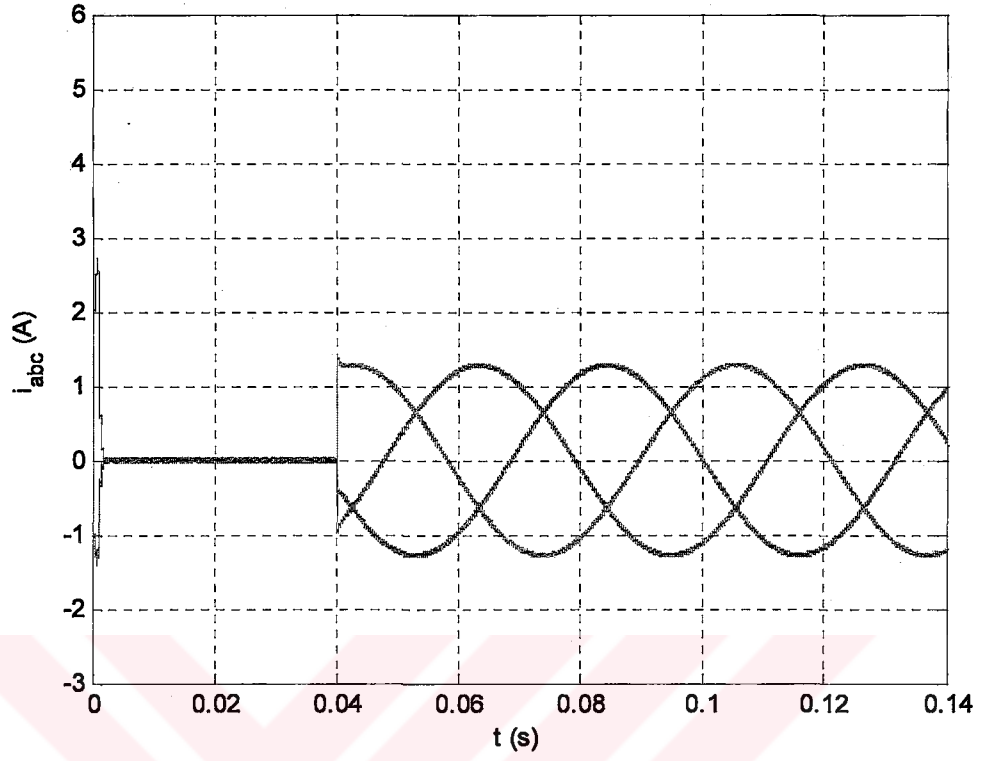
Şekil 5.34. DMSM'nin,  $T_L=1.03$  Nm ile ani yüklenmesi sonucu BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyicilerin hız cevapları.



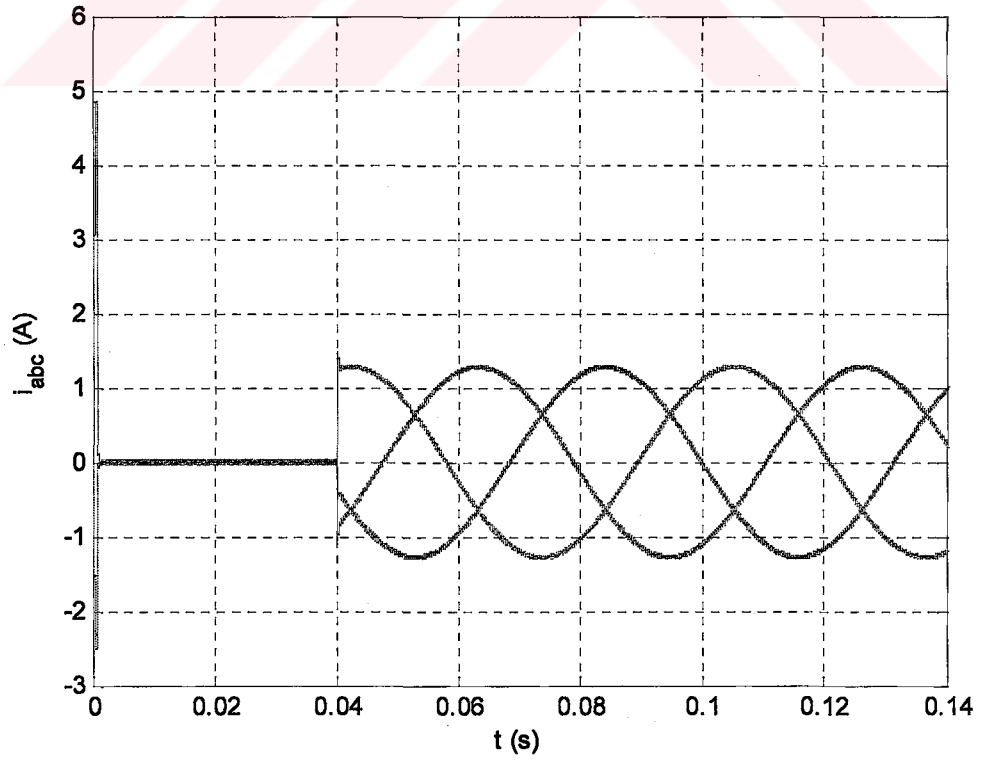
Şekil 5.35. DMSM'nin PI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile ani yüklü durumda elde edilen  $i_{abc}$  akım değerlerinin zamana göre değişimleri.



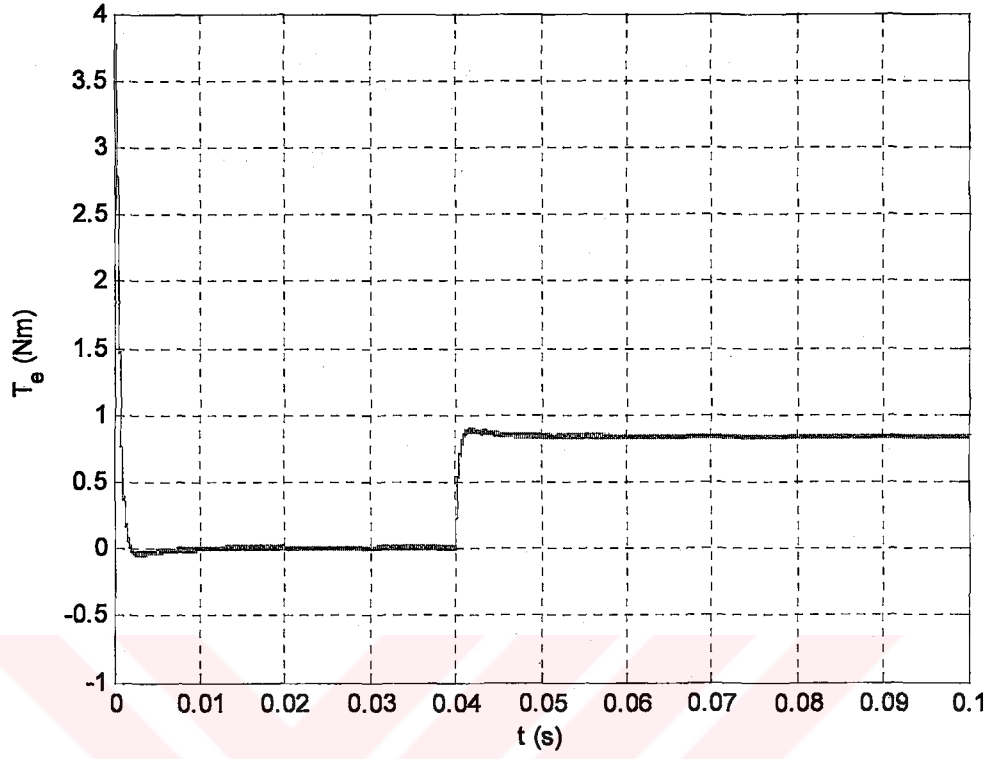
Şekil 5.36. DMSM'nin BM denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile ani yüklü durumda elde edilen  $i_{abc}$  akım değerlerinin zamana göre değişimleri.



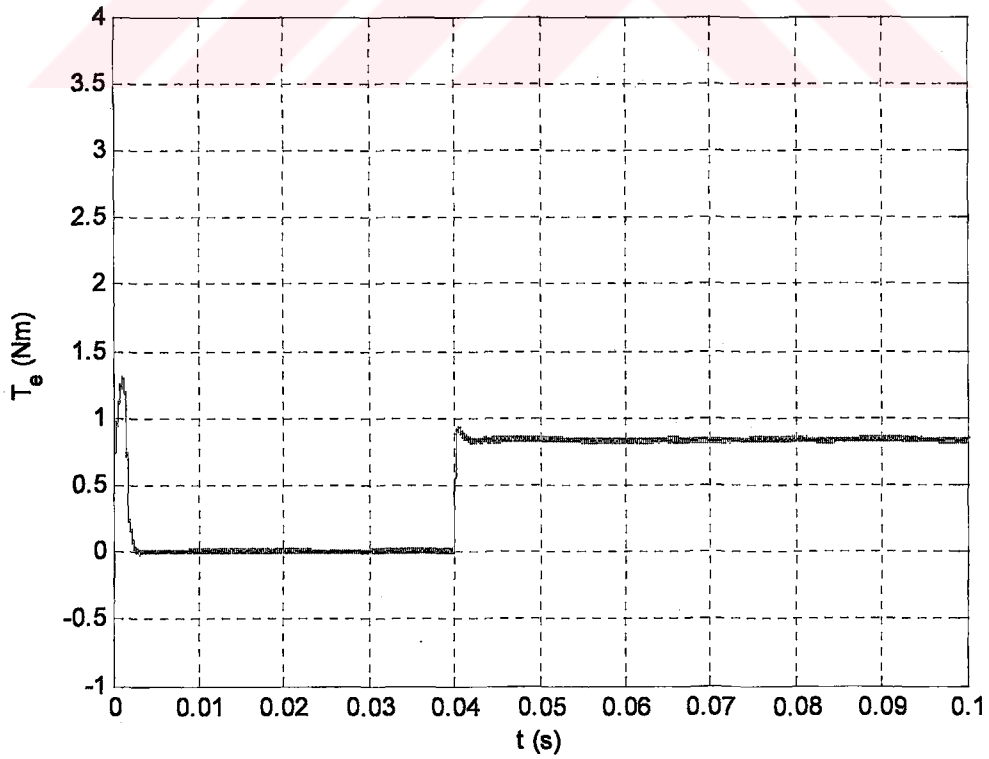
Şekil 5.37. DMSM'nin BMPI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile ani yüklü durumda elde edilen  $i_{abc}$  akım değerlerinin zamana göre değişimleri.



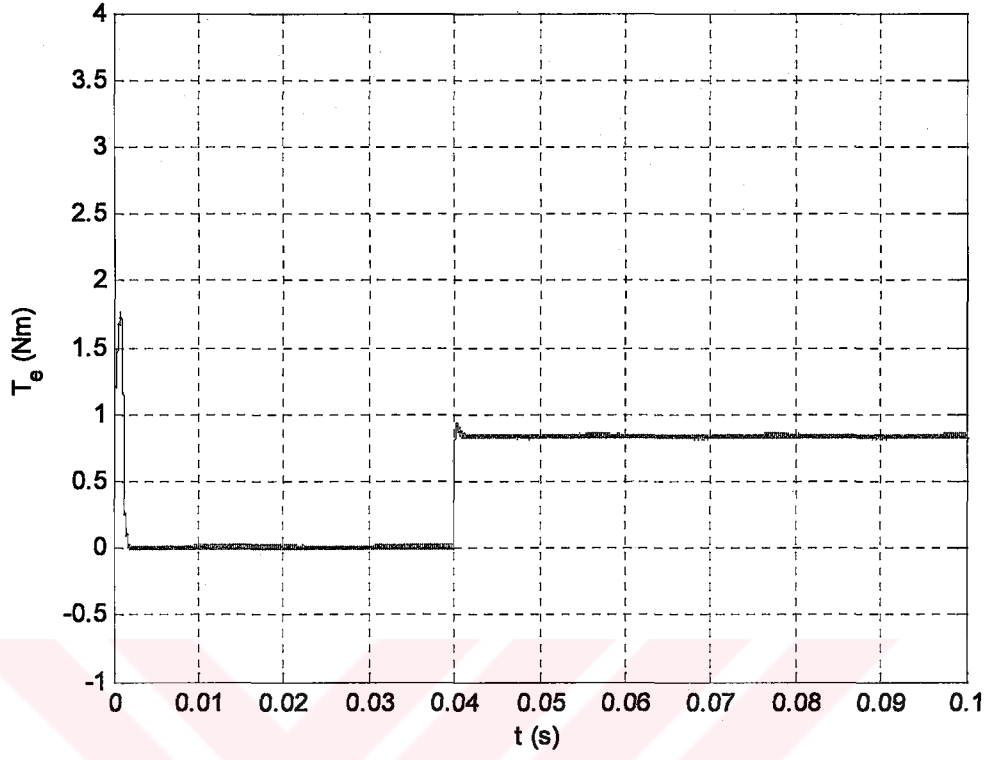
Şekil 5.38. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile ani yüklü durumda elde edilen  $i_{abc}$  akım değerlerinin zamana göre değişimleri.



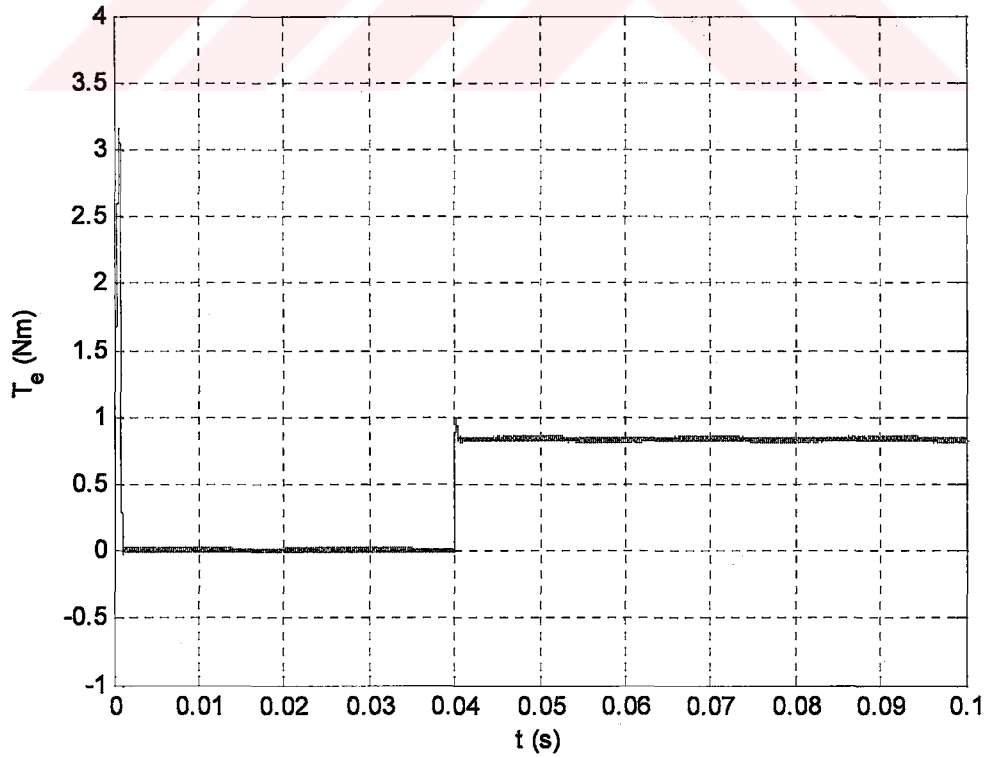
Şekil 5.39. DMSM'nin PI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile ani yüklü durumda elde edilen  $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.



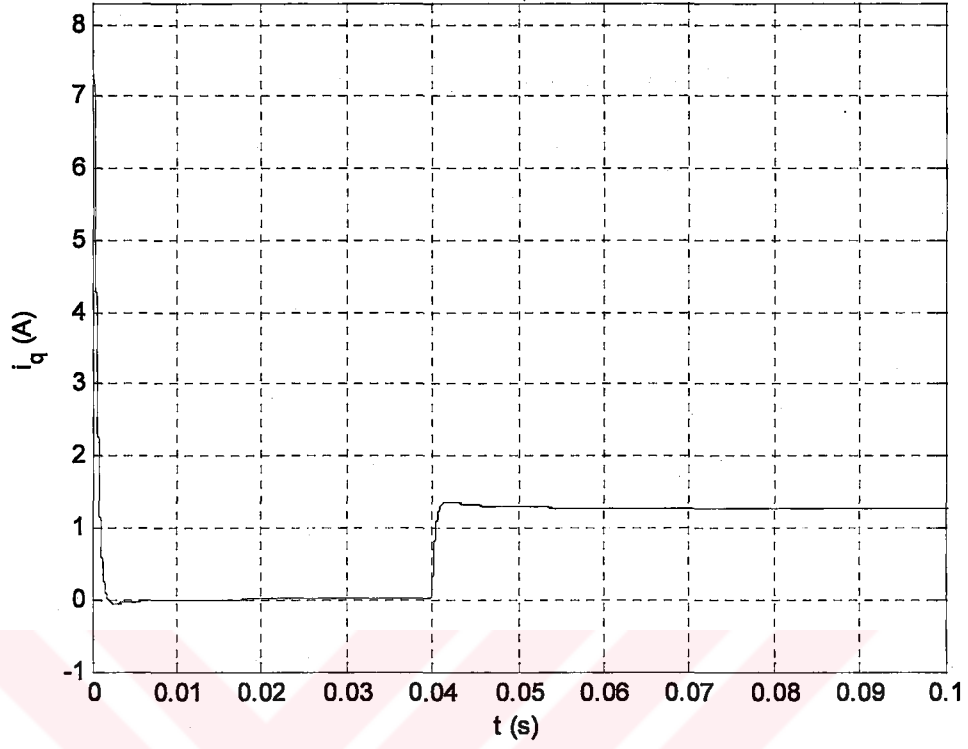
Şekil 5.40. DMSM'nin BM denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile ani yüklü durumda elde edilen  $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.



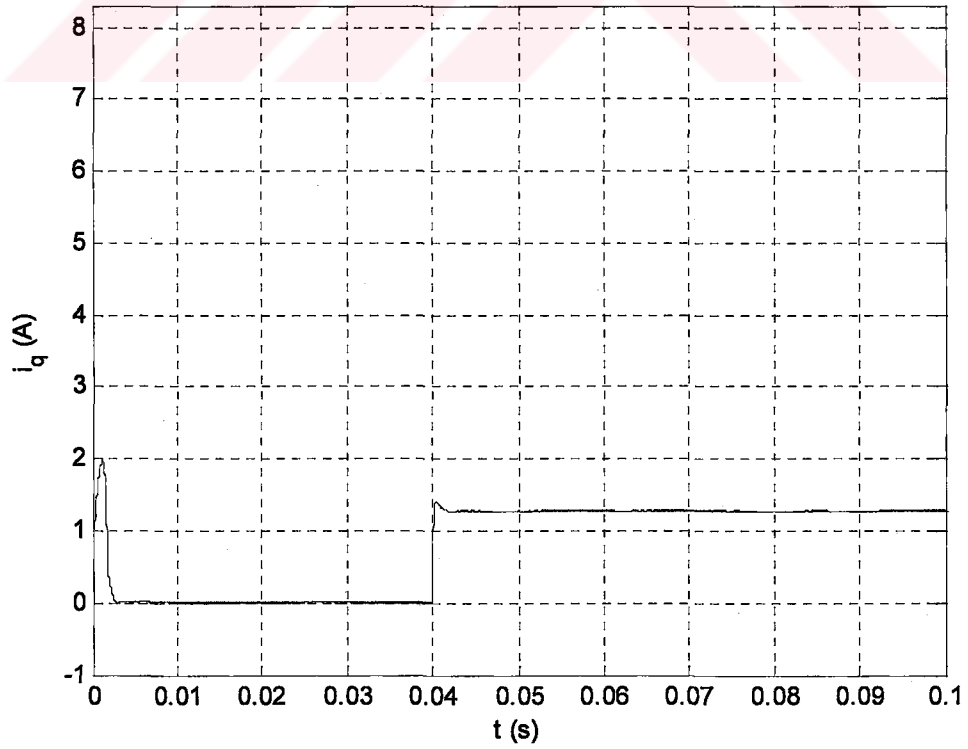
Şekil 5.41. DMSM'nin BMPI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile ani yüklü durumda elde edilen  $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.



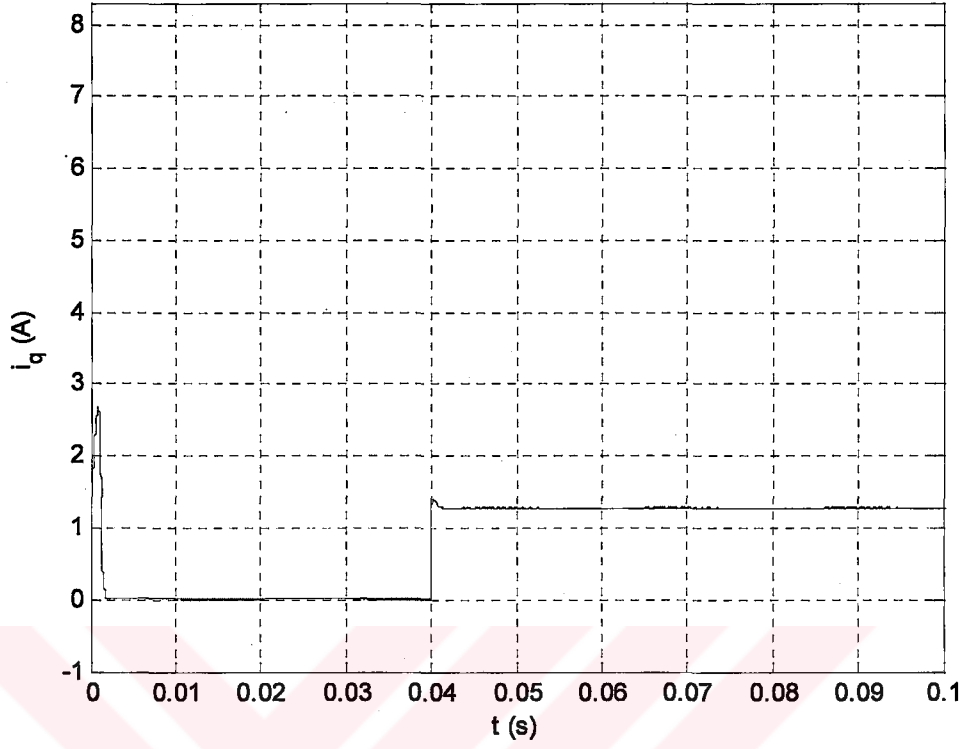
Şekil 5.42. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile ani yüklü durumda elde edilen  $T_e$ 'nin zamana göre değişimi.



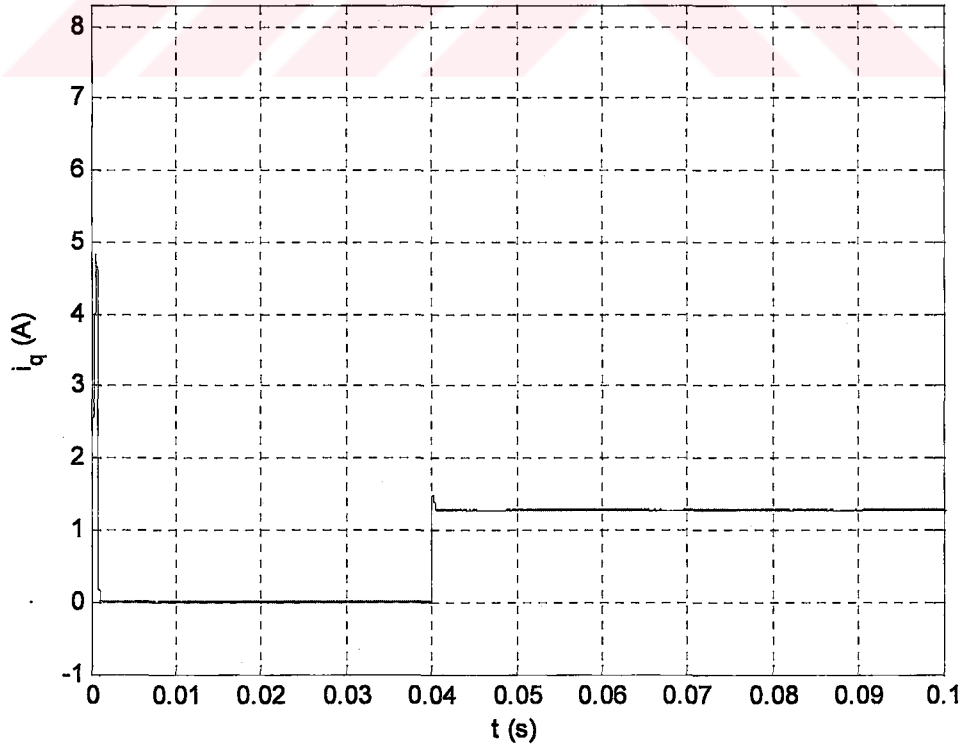
Şekil 5.43. DMSM'nin PI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile ani yüklü durumda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.



Şekil 5.44. DMSM'nin BM denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile ani yüklü durumda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.



Şekil 5.45. DMSM'nin BMPI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile ani yüklü durumda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.



Şekil 5.46. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile ani yüklü durumda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.

#### 5.4. Referans Hız Takibi

Motor yüklü ve yüksüz durumda kalkış yaptıktan sonra, PI denetleyicide 0.03 s'den başlayarak 0.03 s aralıklarla, diğer denetleyicilerde ise 0.004 s aralıklarla referans hız 100 ile 80 rad/s olarak değiştirilmektedir. Bu değişim sonucunda, denetleyicilerden elde edilen hız cevapları Şekil 5.47, Şekil 5.48, Şekil 5.49, Şekil 5.50, Şekil 5.51 ve Şekil 5.52'de görülmektedir. DMSM'nin  $T_L=0$  ve 0.83 Nm ile yüklü durumda, referans hız değişim sonucu elde edilen  $i_q$  akım değişimleri ise Şekil 5.53, Şekil 5.54, Şekil 5.55, Şekil 5.56, Şekil 5.57, Şekil 5.58, Şekil 5.59 ve Şekil 5.60'de görülmektedir.

Referans hız takibi sonucu elde edilen grafikler, dört zaman diliminde incelenmektedir. Zaman dilimleri, referans hızın değişimine göre alınmıştır. Bunlar: PI denetleyici için, birinci zaman dilimi; 0.03↔0.06, ikinci zaman dilimi; 0.06↔0.09, üçüncü zaman dilimi; 0.09↔0.12 ve dördüncü zaman dilimi; 0.12↔0.15'dir. BM, BMPI ve ÖABMPI için ise, birinci zaman dilimi; 0.004↔0.008, ikinci zaman dilimi; 0.008↔0.012, üçüncü zaman dilimi; 0.012↔0.016 ve dördüncü zaman dilimi; 0.016↔0.02'dir.

Referans hız takibinde elde edilen sonuçlar Tablo 5.9, Tablo 5.10, Tablo 5.11 ve Tablo 5.12'de görülmektedir. Tablolar incelendiğinde, ÖABMPI denetleyicinin en kısa zamanda referans hız değişim değerine ulaştığı, BMPI denetleyicide aşma miktarının diğer denetleyicilere nazaran daha düşük olduğu, PI denetleyicinin ise hızın referans değere ulaşması ve aşma miktarı bakımından en kötü sonucu verdiği görülmektedir. Yük değişimine göre, tüm denetleyicilerde hızın referans değere ulaşma zamanı ve aşma miktarı bakımından fazla bir değişiklik olmadığı görülmektedir.

Tablo 5.9. DMSM'nin TL=0 Nm ile yüklü durumda, denetleyicilerin referans hız takibi performans analizi.

Denetleyici	1. zaman dilimi		2. zaman dilimi	
	$t_{so}$ (s)	$O_s$ (%)	$t_{sL}$ (s)	$O_s$ (%)
PI	0.01900	1.4279	0.02000	1.4343
BM	0.00290	0.0872	0.00260	0.0102
BMPI	0.00220	0.0359	0.00185	0.0079
ÖABMPI	0.00105	0.3454	0.00125	0.2679
Denetleyici	3. zaman dilimi		4. zaman dilimi	
	$t_{sL}$ (s)	$O_s$ (%)	$t_{sL}$ (s)	$O_s$ (%)
PI	0.0242	1.4306	0.0266	1.4696
BM	0.0029	0.0616	0.0025	0.0112
BMPI	0.0020	0.0236	0.0019	0.0068
ÖABMPI	0.0012	0.5430	0.0012	0.1908

Tablo 5.10. DMSM'nin TL=0.63 Nm ile yüklü durumda, denetleyicilerin referans hız takibi performans analizi.

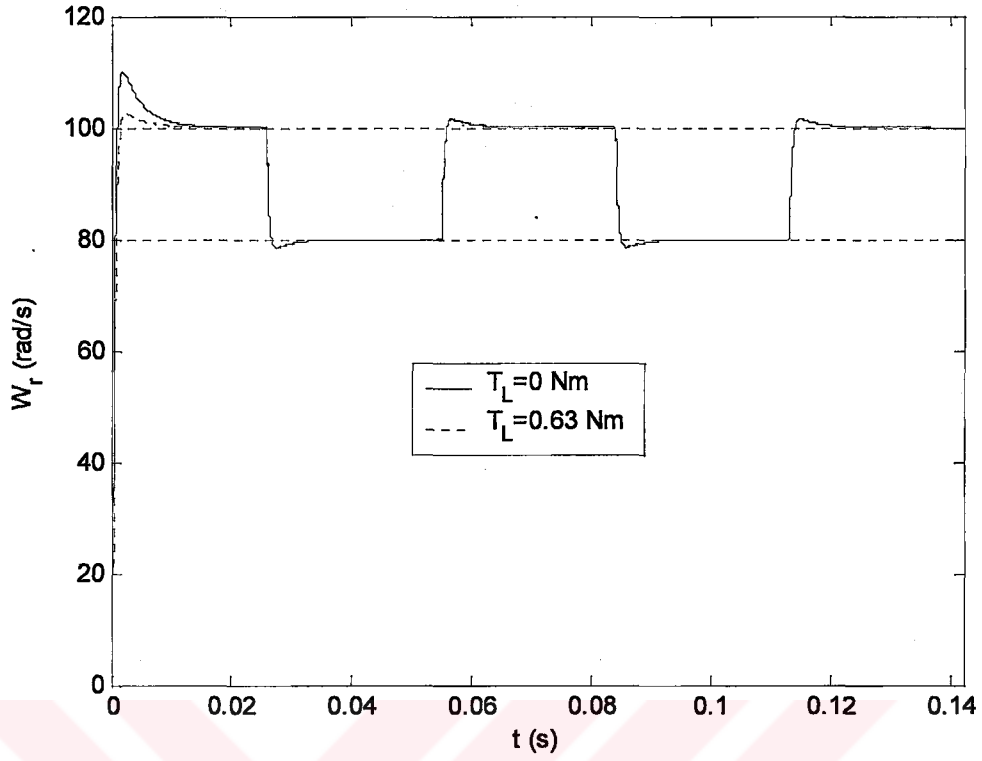
Denetleyici	1. zaman dilimi		2. zaman dilimi	
	$t_{sL}$ (s)	$O_s$ (%)	$t_{sL}$ (s)	$O_s$ (%)
PI	0.0252	1.4199	0.02780	1.45740
BM	0.0029	0.0294	0.00270	0.00760
BMPI	0.0019	0.0160	0.00200	0.00790
ÖABMPI	0.0012	0.4806	0.00095	0.21210
Denetleyici	3. zaman dilimi		4. zaman dilimi	
	$t_{sL}$ (s)	$O_s$ (%)	$t_{sL}$ (s)	$O_s$ (%)
PI	0.0244	1.4376	0.0190	1.4512
BM	0.0029	0.0511	0.0025	0.0120
BMPI	0.0020	0.0303	0.0021	0.0095
ÖABMPI	0.0010	0.5299	0.0010	0.1702

Tablo 5.11. DMSM'nin TL=0.83 Nm ile yüklü durumda, denetleyicilerin referans hız takibi performans analizi.

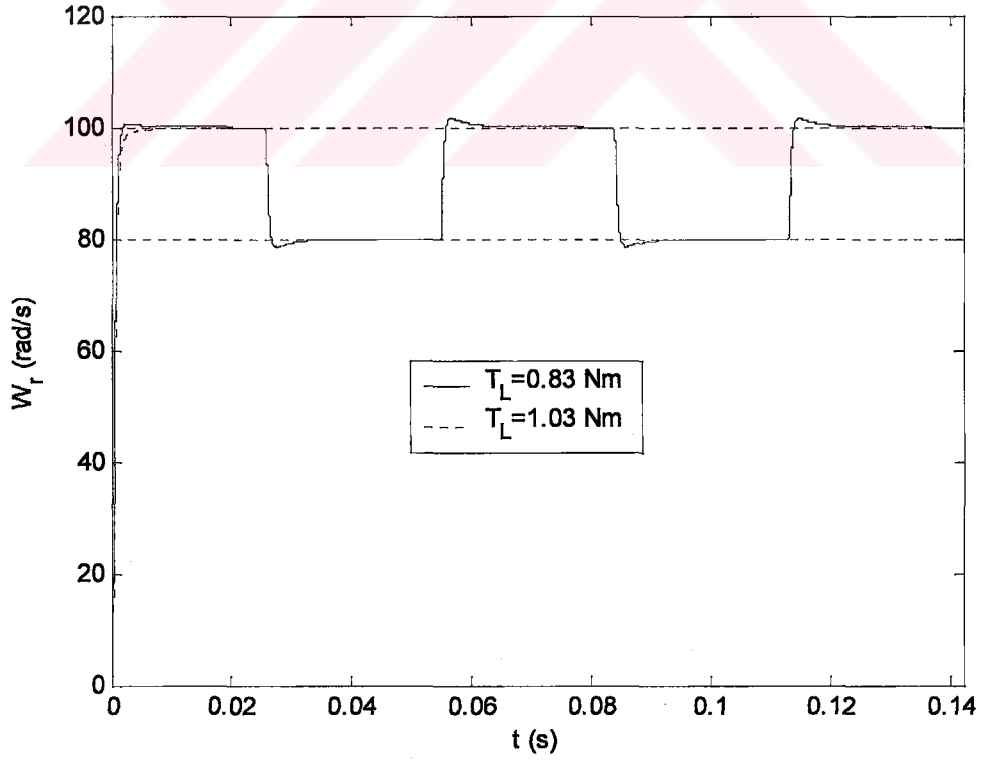
Denetleyici	1. zaman dilimi		2. zaman dilimi	
	$t_{sL}$ (s)	$O_s$ (%)	$t_{sL}$ (s)	$O_s$ (%)
PI	0.02540	1.4197	0.02800	1.46330
BM	0.00290	0.0538	0.00270	0.01090
BMPI	0.00220	0.0194	0.00190	0.00340
ÖABMPI	0.00123	0.4414	0.00092	0.30380
Denetleyici	3. zaman dilimi		4. zaman dilimi	
	$t_{sL}$ (s)	$O_s$ (%)	$t_{sL}$ (s)	$O_s$ (%)
PI	0.0246	1.4349	0.0268	1.4712
BM	0.0031	0.0643	0.0030	0.0108
BMPI	0.0017	0.0168	0.0020	0.0123
ÖABMPI	0.0012	0.5230	0.0009	0.1828

Tablo 5.12. DMSM'nin TL=1.03 Nm ile yüklü durumda, denetleyicilerin referans hız takibi performans analizi.

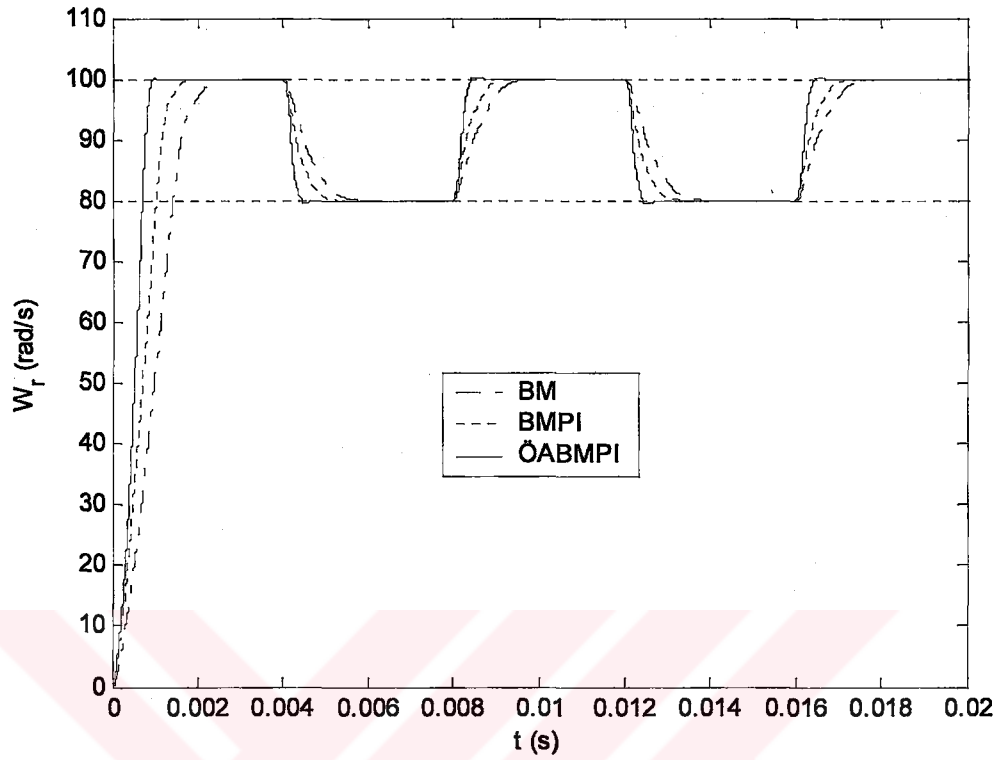
Denetleyici	1. zaman dilimi		2. zaman dilimi	
	$t_{sL}$ (s)	$O_s$ (%)	$t_{sL}$ (s)	$O_s$ (%)
PI	0.0256	1.4182	0.0282	1.4531
BM	0.0034	0.0351	0.0029	0.0102
BMPI	0.0021	0.0251	0.0020	0.0114
ÖABMPI	0.0014	0.3824	0.0010	0.2633
Denetleyici	3. zaman dilimi		4. zaman dilimi	
	$t_{sL}$ (s)	$O_s$ (%)	$t_{sL}$ (s)	$O_s$ (%)
PI	0.0246	1.4348	0.0268	1.4719
BM	0.0028	0.0648	0.0025	0.0119
BMPI	0.0022	0.0166	0.0024	0.0112
ÖABMPI	0.0013	0.5368	0.0010	0.2533



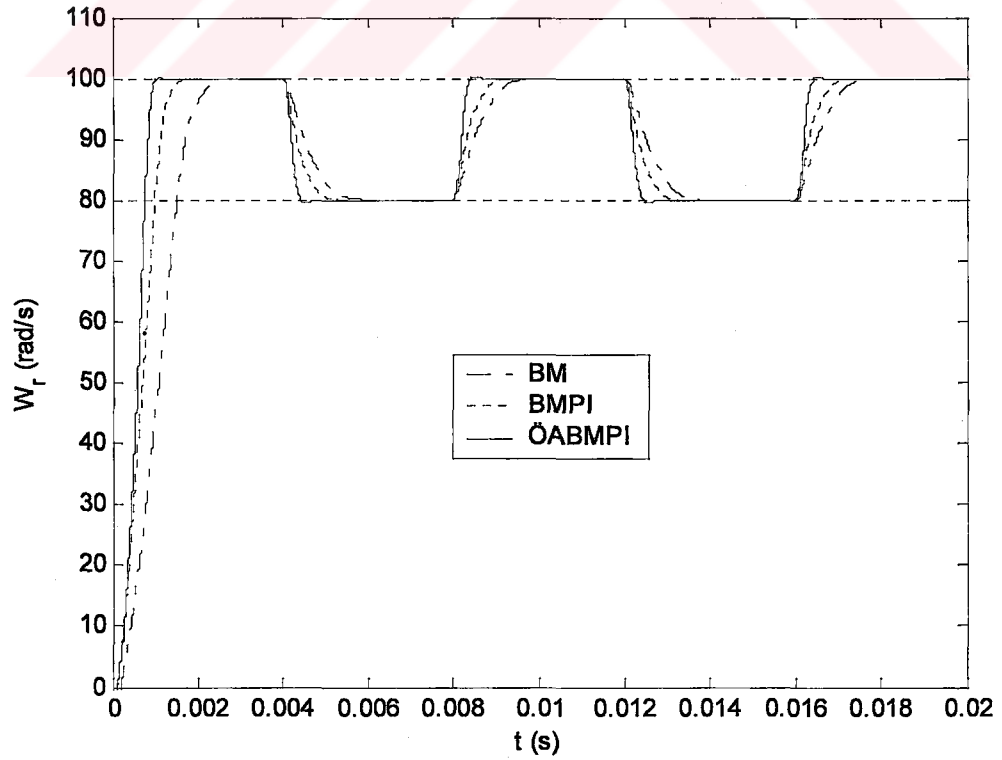
Şekil 5.47. DMSM'nin  $T_L=0$  ve 0.63 Nm ile yüklü durumda, PI denetleyici kullanılarak, referans hız değişiminde elde edilen grafikler.



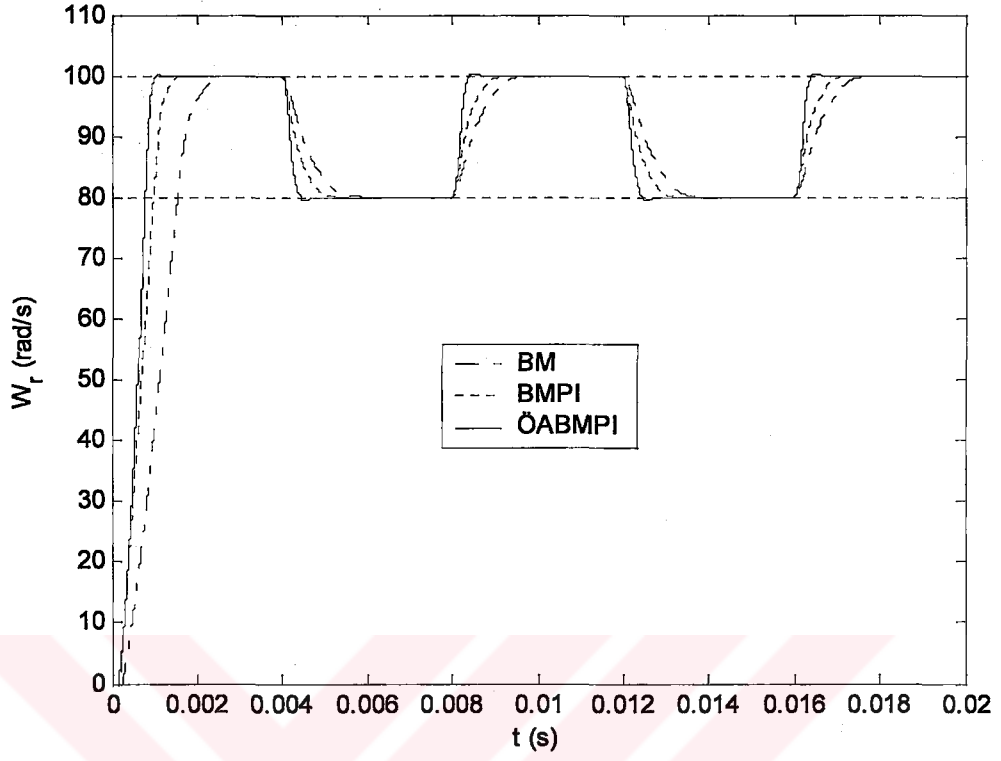
Şekil 5.48. DMSM'nin  $T_L=0.83$  ve 1.03 Nm ile yüklü durumda, PI denetleyici kullanılarak, referans hız değişiminde elde edilen grafikler.



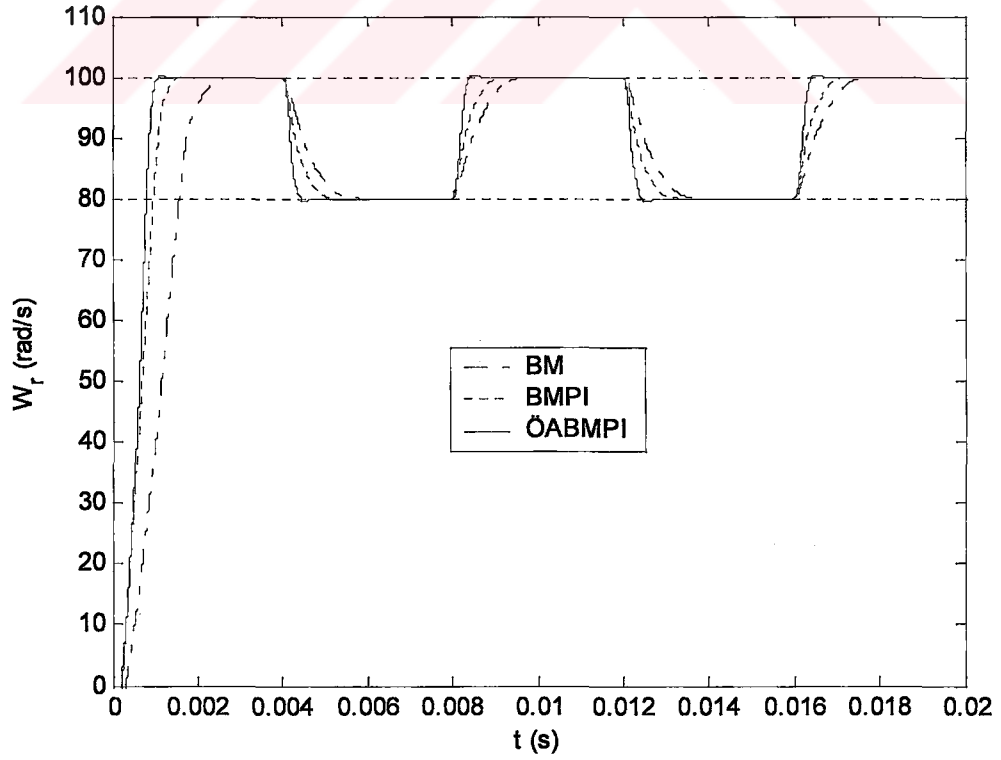
Şekil 5.49. DMSM'nin  $T_L=0$  Nm ile yüklü durumda, BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyici kullanılarak, referans hız değişiminde elde edilen grafikler.



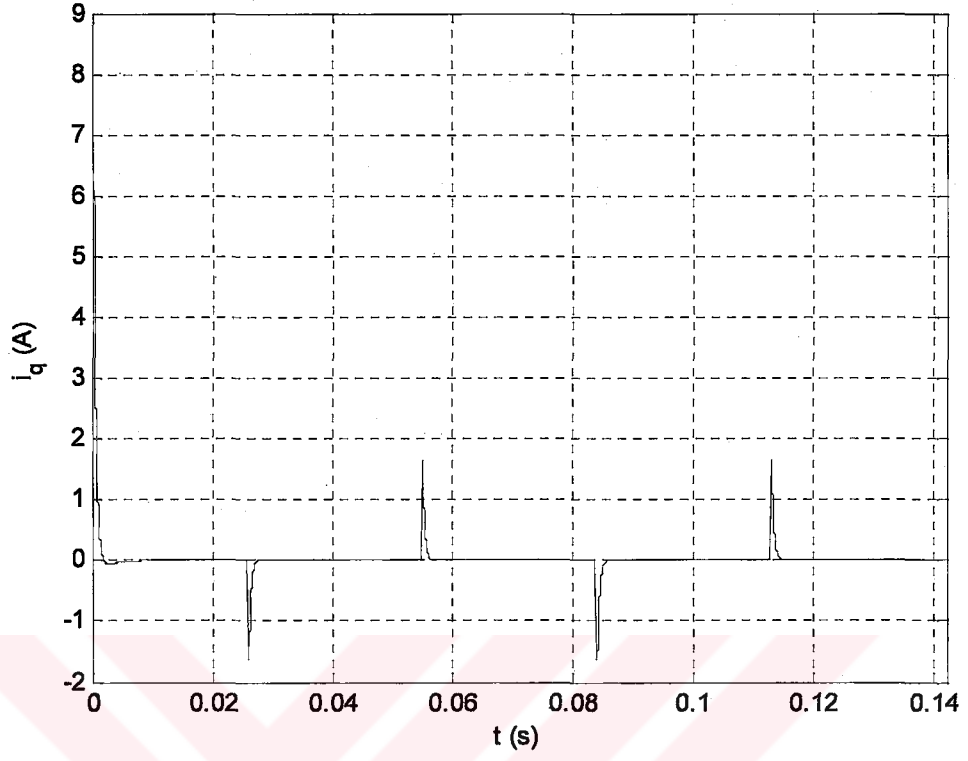
Şekil 5.50. DMSM'nin  $T_L=0.63$  Nm ile yüklü durumda, BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyici kullanılarak, referans hız değişiminde elde edilen grafikler.



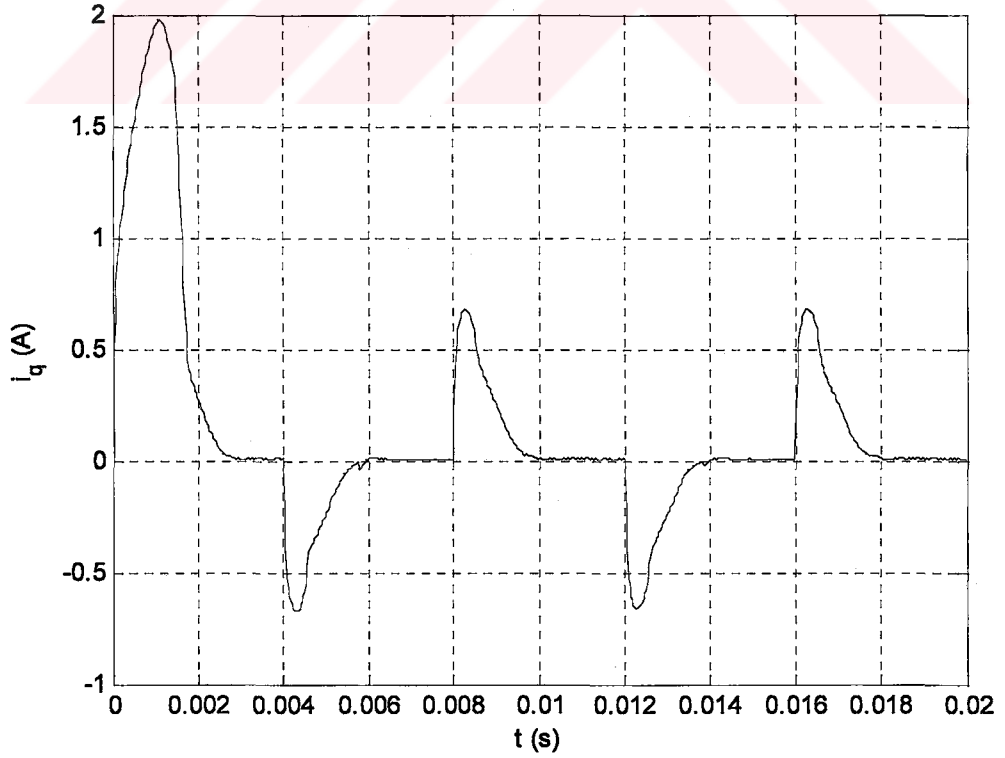
Şekil 5.51. DMSM'nin  $T_L=0.83$  Nm ile yüklü durumda, BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyici kullanılarak, referans hız değişiminde elde edilen grafikler.



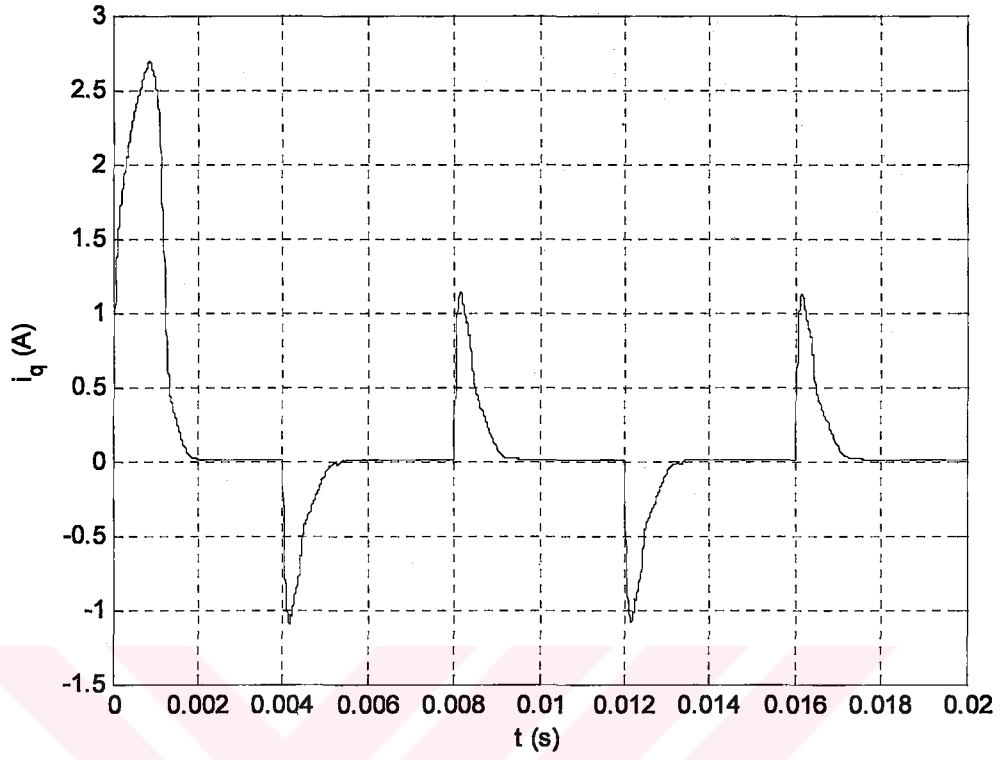
Şekil 5.52. DMSM'nin  $T_L=1.03$  Nm ile yüklü durumda, BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyici kullanılarak, referans hız değişiminde elde edilen grafikler.



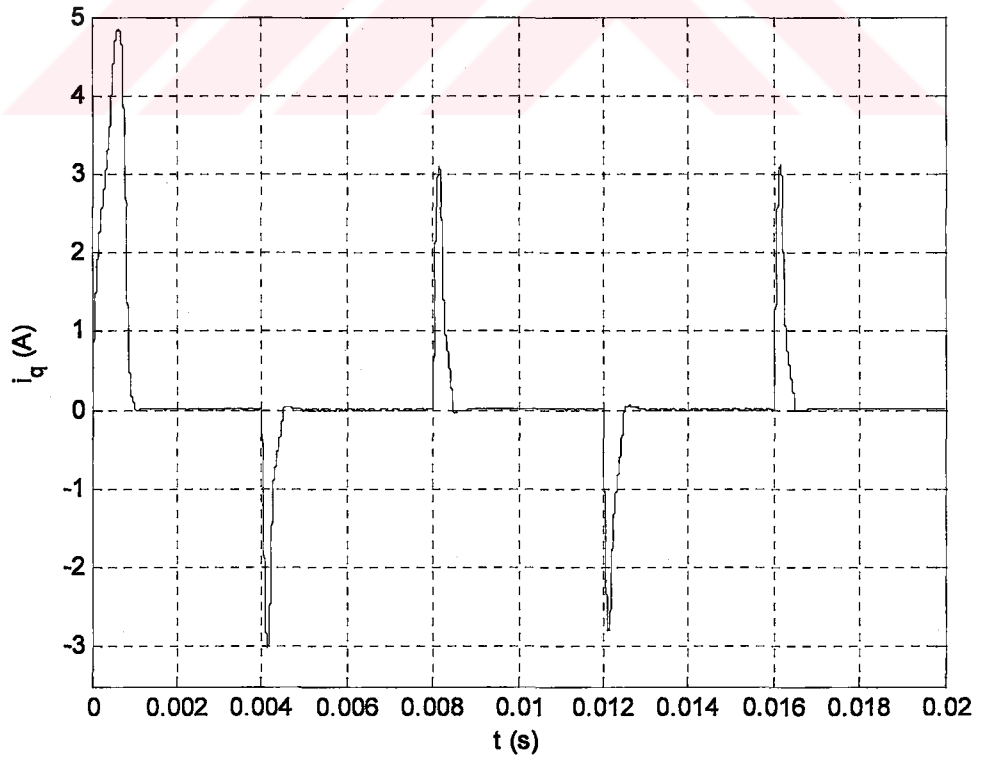
Şekil 5.53. DMSM'nin PI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0$  Nm ile referans hız takibi durumunda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.



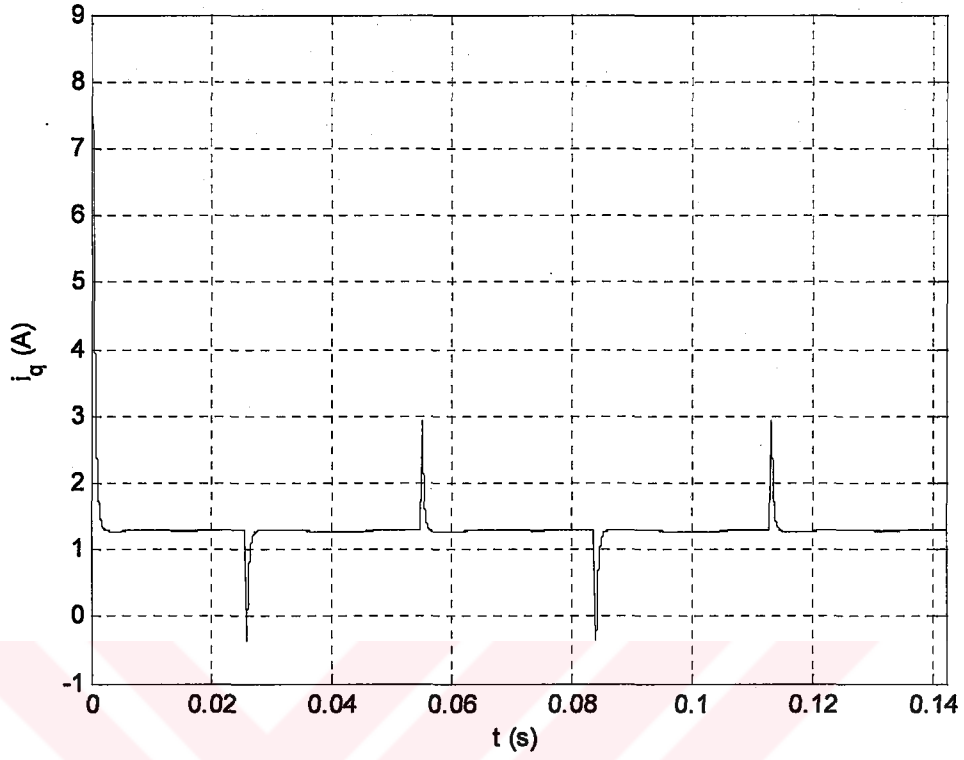
Şekil 5.54. DMSM'nin BM denetleyici kullanılarak,  $T_L=0$  Nm ile referans hız takibi durumunda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.



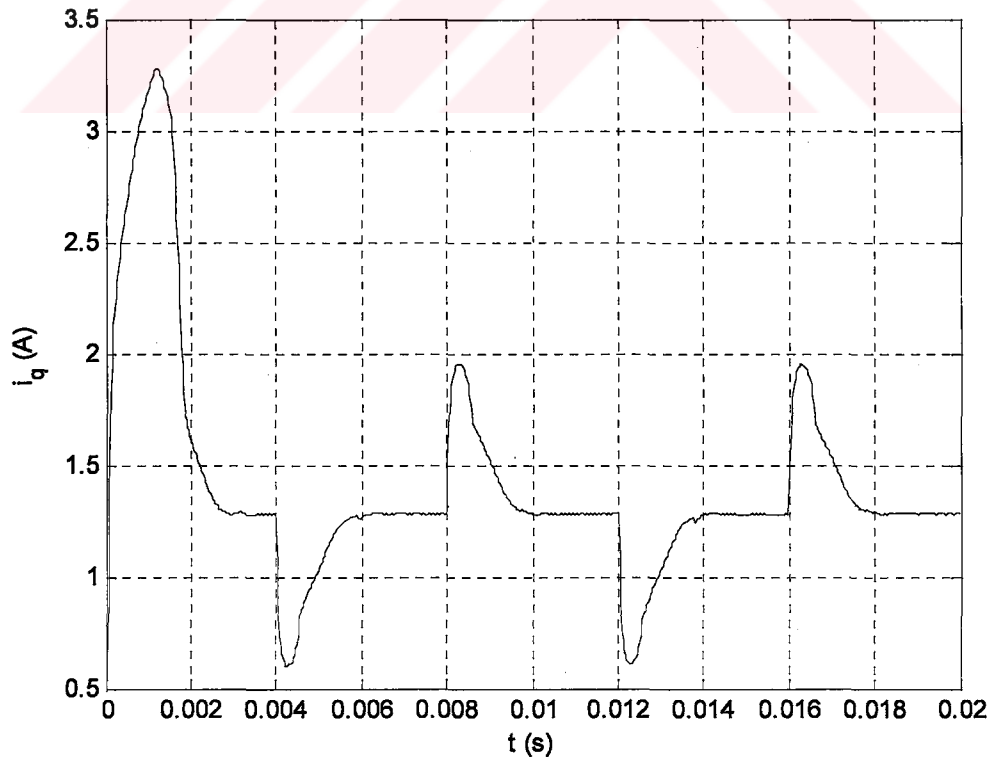
Şekil 5.55. DMSM'nin BMPI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0$  Nm ile referans hız takibi durumunda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.



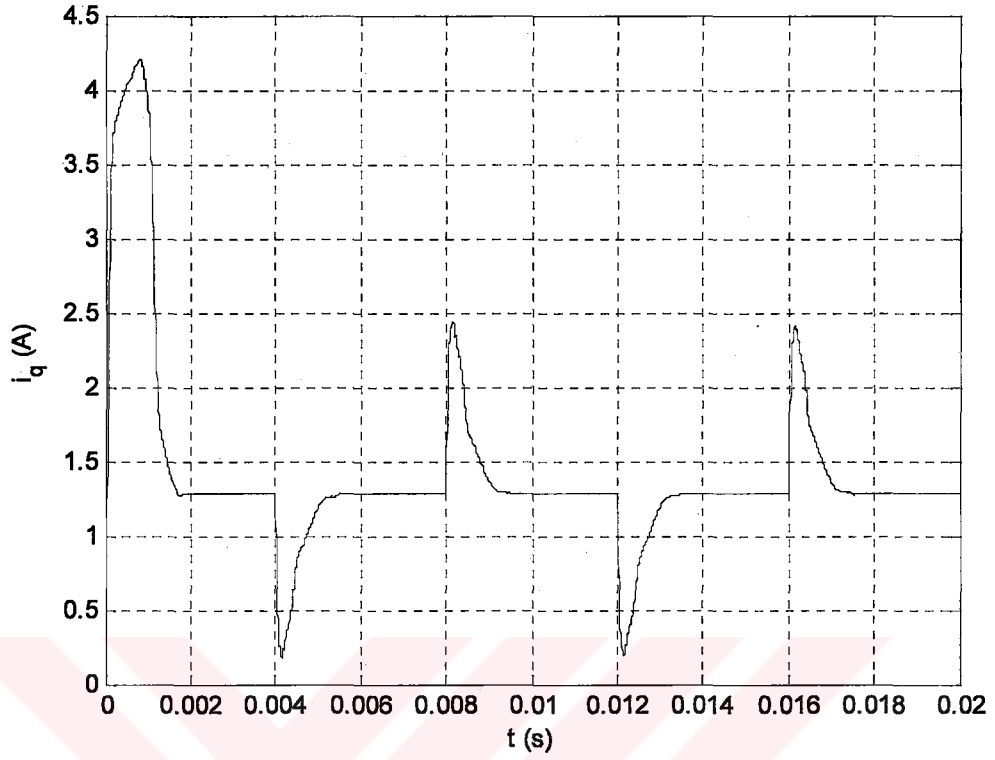
Şekil 5.56. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0$  Nm ile referans hız takibi durumunda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.



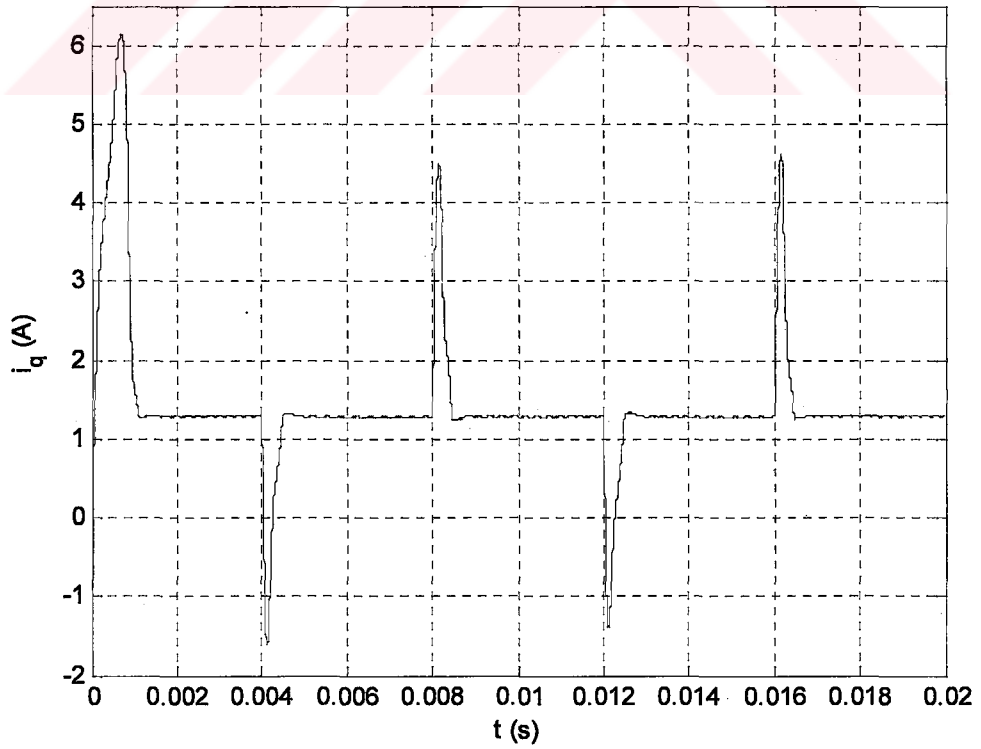
Şekil 5.57. DMSM'nin PI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile referans hız takibi durumunda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.



Şekil 5.58. DMSM'nin BM denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile referans hız takibi durumunda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.



Şekil 5.59. DMSM'nin BMPI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile referans hız takibi durumunda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.



Şekil 5.60. DMSM'nin ÖABMPI denetleyici kullanılarak,  $T_L=0.83$  Nm ile referans hız takibi durumunda elde edilen  $i_q$  akımının zamana göre değişimi.

## SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Günümüzde elektrik motorlarının endüstride kullanım alanları oldukça geniştir. Kullanım alanının bu kadar geniş olması, araştırmacıların elektrik motorlarının daha verimli ve denetim yöntemlerinin daha üstün performansta olması için çeşitli çalışmalara yönelmektedir. Bu çalışmalar sonucunda geleneksel senkron motorun rotoruna, sargıların işlevini yerine getirebilecek olan mıknatısların uygun formda yerleştirilmesi sonucu DMSM'ler geliştirilmiştir.

Geleneksel senkron motorda manyetik alan oluşumu için fırçalar, bilezikler ve rotora yerleştirilen sargıların bulunması, hacim ve kütesinin DMSM'lere nazaran daha fazla olması gibi dezavantajlar, DMSM'lerin sanayide kullanımını daha da artırmaktadır. Bunlara ek olarak güç yoğunluğunun fazla olması, yüksek moment elde edilebilmesi ve asenkron motorlara göre daha verimli olması da geleneksel motorlara nazaran avantaj olarak görülmektedir.

DMSM'lerin üstünlüklerinin yanı sıra denetiminin de daha iyi olması için çeşitli yöntemler geliştirilmektedir. Bu çalışmada, DMSM'nin matematiksel modeli çıkarılmakta ve elde edilen modelin simülasyonu Matlab/Simulink paket programında gerçekleştirilmektedir. Simülasyonda kullanılan parametreler, deneysel çalışmalardan ve motor katalog bilgilerinden elde edilmektedir. Hız denetimi için PI, BM, BMPI ve ÖABMPI denetleyiciler kullanılarak, yükselme zamanı, aşma miktarı ve kalıcı durum hatası bakımından hangi denetim yönteminin daha iyi performans sağladığı yüzdesel olarak belirlenmektedir.

DMSM'nin değişik yüklerle yüklenerek ve referans hız takibi yaptırılarak, hızın referans değere ulaşması, kalıcı durum hatası ve aşma miktarı bakımından denetleyicilerin performansları da karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırmalarda, motorun yüksüz ve nominal yükü ile yüklenmesi sonucu elde edilen değerler referans alınarak, denetleyicilerin performans analizi yapılmaktadır.

Karşılaştırmalar sonucunda; DMSM'nin yüksüz, yüklü ve ani yüklü durumlarda hızın referans değere ulaşmasında en iyi performansı ÖABMPI denetleyici vermektedir. Tablo 5.2, Tablo 5.4 ve Tablo 5.8 incelendiğinde, yüksüz durumda ÖABMPI denetleyici; PI denetleyiciden %94, BM denetleyiciden %46 ve BMPI denetleyiciden %32 daha hızlı bir şekilde hızın referans değere ulaşmasını sağlamaktadır. Yüklü durumda, PI denetleyiciden %86, BM denetleyiciden %44 ve BMPI denetleyiciden %24 daha hızlı bir şekilde hızın referans değere ulaşmasını sağlamaktadır. Ani yüklü durumda, PI denetleyiciden %96, BM denetleyiciden %82 ve BMPI denetleyiciden %42 daha hızlı bir şekilde hızın referans değere ulaşmasını sağlamaktadır. Ani yüklü durumdaki yüzdesel değerlere bakıldığında, ÖABMPI denetleyici diğer denetleyicilere göre hızın nominal değere ulaşma performansı bakımından üstünlüğünün artmakta olduğu görülmektedir. Genel olarak bakıldığında, ÖABMPI denetleyicinin diğer denetleyicilere nazaran Daimi Miknatıslı Senkron Motor için en iyi performansı gösterdiği sonucuna varılmaktadır.

## KAYNAKLAR

1. ATACAK, İ., BAY, Ö.F., 2004. Bulanık mantık denetimli seri aktif güç filtresi kullanarak harmonik gerilimlerin bastırılması. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 19, no: 2, s. 205-215.
2. BOSE, B. K., 1994. Expert systems, fuzzy logic, and neural network application in power electronics and motion control. Proc. IEEE, Vol 82. pp. 1303-1323.
3. CHALMERS, B.J., AKMEŞE, R., MUSABA, L., 1998. Validation of Prosedure for Prediction of Field-Weakening Performance of Brushless Synchronous Machines, ICEM, col. 1/3, p.p. 320.
4. CHANDANA PERERA, P.D., 2003. Sensorless Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives. Institute of Energy Technology Aalborg Universitet, Electrical and Electronic Engineering.
5. CHIRICOZZI, E., PARASILITI, F., TURSINI, M., ZHANG, D.Q., 1995. Fuzzy self-tuning PI control of PM synchronous motor drives. Power Electronics and Drive Systems International Conference, Vol 2. pp. 749-754.
6. ELMAS, Ç., 2003. Bulanık Mantık Denetleyiciler. Sökesen Matbaası, s. 27, Ankara.
7. EMAMI, M.R., TURKSEN, I.B., GOLDENBURG, A. A., 1998. Development of a systematic methodology of fuzzy logic modeling. IEEE Trans. On Fuzzy Systems. Vol 6. No 3. pp. 346-361.
8. GÖKBULUT, M., AKGÜN, B., 1988. Elektrik motorlarının kontrolü. Delmar Publishers Inc.. United States of America.
9. GÜNEY, İ., YÜKSEL, O., SERTELLER, F., 2001. Dynamic behaviour model of permanent magnet synchronous motor fed by PWM inverter and fuzzy logic controller for stator phase current, flux and torque control of PMSM. International Electric Machines and Drive Conference, pp. 479-485.
10. HAYASHI, S., 1991. Auto-tuning fuzzy PI controller. Proc. IFSA, pp. 41-44.
11. HE, S. Z., TAN, S., XU, F.L., WANG, P.Z., 1993. Fuzzy self tuning of PID controller. Fuzzy Sets and Systems, Vol 56. 37-47.
12. KANDEL, A., LANGHOLZ, G., 1994. Fuzzy Control Systems. CRC Press, London.
13. KRAUSE, P.C., 1987. Analysis of electric machinery. McGraw-Hill, New York.

14. MAEDA, M., MURAKAMI, S., 1992. A self-tuning fuzzy controller. *Fuzzy Sets and Systems*, Vol 51. 29-40.
15. MUDI, R. K., PAL, N. R., 2000. A self-tuning fuzzy PI controller. *Fuzzy Sets and Systems*, Vol 115. pp. 327-338.
16. OHISHI, K., YOSHIDA, K., 2003. Current sensor-less speed servo system of PM motor based on self-tuning current simulator. *International Electric Machines and Drives Conference*, pp. 1895-1900.
17. OHM, D.Y., BROWN, J. W., CHAVA, V.B., 1995. Modeling and parameter characterization of permanent magnet synchronous motor. *Proceeding of the 24th Annual Symposium of Incremental Motion Control Systems and Devices*, Sn Jose, pp. 81-86.
18. OGATA, K. "Modern control engineering", Englewood Cliffs : Prentice-Hall International Editions, New Jersey, 1996.
19. PATEL, A. V., MOHAN, B. M., 2002. Analytical structures and analysis of the simplest fuzzy PI controllers. *Automatica*, Vol 38. pp. 981-993.
20. PROCYK, T.J., MAMDANI E.H., 1979. A linguistic self-organizing process controller, *Automatica*, Vol 15. No 1. 53-65.
21. RAHMAN, M. A., HOQUE, M. A., 1997. On-line self-tuning ANN based speed control of a PM DC motor. *IEEE/ASME Trans. On Mechatronics*, Vol 2. No 3. pp.169-178.
22. SENJYU, T., KUWAE Y., URASAKI N., UEZATO K., 2001. Accurate parameter measurement for high speed permanent magnet synchronous motors. *Power Electronics Specialists Conference*, Vol 2. pp. 772-777.
23. SHAO, S., 1998. Fuzzy self-organizing control and its application for dynamical systems. *Fuzzy Sets and Systems*, Vol 26. 151-164.
24. SINGH, B., PUTTA SWAMY, C.L., SINGH, B.P., CHANDRA, A., AL-HADDAD, K., 1995. Performance analysis of fuzzy logic controlled permanent magnet synchronous motor drive. *Proceedings of IEEE-ICON*, Vol 1. No 1. 399-405.
25. SOUSA, G.C.D., BOSE, B.K., 1991. A fuzzy set theory based control of a phase-controlled converter dc machine drive. *Industry Applications Society Annual Meeting Conference Record*, pp. 854-861.
26. UDDIN, M. N., RAHMAN M. A., 2000. Fuzzy logic based speed control of an IPM synchronous motor drive. *Journal of Advanced Computational Intelligence*, Vol 4. No 2. pp. 212-219.

27. YAGER, R. R., FILEV, D. P., "Essentials of fuzzy modeling and control", John Wiley & Sons Inc., Canada, 1994.
28. YI, S.Y., CHUNG, M. J., 1998. Robustness of fuzzy logic control for an uncertain dynamic system. IEEE Trans. On Fuzzy Systems, Vol 6. No 2. pp. 216-224.



## ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Erzurum'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 1997 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi bölümünden 2002 yılında Elektrik Teknik Öğretmeni olarak mezun oldu. 2002 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü Elektrik Makineleri Anabilim Dalına Araştırma Görevlisi olarak girdi ve halen Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

